

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Daniel Pustički

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Zdravko Schauperl, dipl. ing.

Student:

Daniel Pustički

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja i iskustva stečena na studiju, kao i navedenu literaturu.

Ovim putem prvenstveno zahvaljujem svom mentoru prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu na pomoći, podršci i ukazanom povjerenju kako pri pisanju ovog rada, tako i tijekom cijelog diplomskog studija.

Zahvaljujem se Laboratoriju za obradu deformiranjem Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu i gospodinu Mateju Šavori na ustupljenom prostoru, opremi, vremenu i radu.

Također veliko hvala tvrtki Yazaki Europe Ltd. – Zagreb na čelu s direktorom Josipom Jelakom na ustupanju opreme za električna ispitivanja, kao i gosp. Mariu Markovu i kolegi Tihomiru Polanoviću na savjetima i pomoći pri ispitivanju.

Hvala i svim kolegama s fakulteta, kolegama iz benda, kao i svim prijateljima na razumijevanju i lijepim trenucima zajedno provedenim.

Na koncu posebno bih se zahvalio mojim roditeljima Zdravku i Marici, sestri Moniki, baki Nadi i djedu Štefu, kao i teti Nikolini s ostalom obitelji na podršci, savjetima i naročito strpljenju tijekom mog školovanja i studiranja.

Daniel Pustički



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske radove
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **DANIEL PUSTIČKI** Mat. br.: **0035187999**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **KARAKTERIZACIJA CU-AL UZORKA DOBIVENOG METALURGIJOM PRAHA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **CHARACTERISATION OF CU-AL MATERIAL OBTAINED BY POWDER METALURGY**

Opis zadatka:

Tehnologija metalurgije praha omogućuje izradu materijala sastava i strukture kakve nije moguće dobiti drugim tehnologijama. Tom tehnologijom je moguće i spajanje različitih materijala, tj. izrada dijelova koji se sastoje od materijala koje nije moguće spojiti tradicionalnim postupcima spajanja kao što je zavarivanje. To je posebno interesantno u automobilske industriji, konkretno u izradi električnih sklopova gdje se bakreni dijelovi sve više zamjenjuju aluminijskim i gdje se javlja potreba za spajanjem ta dva materijala.


U ovom radu potrebno je istražiti mogućnost primjene metalurgije praha za konsolidaciju uzoraka koji se sastoje od bakra i aluminija. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je definirati optimalne parametre postupka hladnog izostatskog prešanja te pomoću te tehnologije izraditi Cu-Al uzorke. Na izrađenim uzorcima potrebno je karakterizirati strukturu i sastav materijala te ispitati električna svojstva važna za automobilske industriju. Na temelju dobivenih rezultata potrebno je donijeti odgovarajuće zaključke vezane uz primjenu te tehnologije za izradu Cu-Al spojeva.

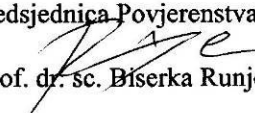
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
18. siječnja 2018.

Rok predaje rada:
22. ožujka 2018.

Predviđeni datum obrane:
28. ožujka 2018.
29. ožujka 2018.
30. ožujka 2018.

Zadatak zadao: 
prof. dr. sc. Zdravko Schauerl

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	II
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
POPIS KRATICA	VIII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
2. Spajanje aluminijske i bakrene 2	2
2.1. Aluminijska 2	2
2.2. Bakar 3	3
2.3. Usporedba svojstava aluminijske i bakrene 5	5
2.4. Načini spajanja aluminijske i bakrene 6	6
2.4.1. Lasersko zavarivanje..... 6	6
2.4.1.1. Vrste lasera..... 7	7
2.4.1.2. Prednosti i nedostaci laserskog zavarivanja..... 8	8
2.4.1.3. Lasersko zavarivanje aluminijske i bakrene..... 9	9
2.4.2. Zavarivanje rotacijskim trenjem 10	10
2.4.2.1. Prednosti i nedostaci zavarivanja rotacijskim trenjem 11	11
2.4.3. Elektromagnetsko pulsno spajanje..... 12	12
2.4.3.1. Prednosti i nedostaci spajanja elektromagnetskim pulsom..... 13	13
2.4.4. Lemljenje 14	14
2.4.4.1. Prednosti i nedostaci lemljenja 15	15
2.4.4.2. Lemljenje aluminijske i bakrene 16	16
2.4.5. Laserski inducirano prevlačenje..... 17	17
2.5. Metalurgija praha 18	18
2.5.1. Prednosti i nedostaci metalurgije praha 19	19
2.5.2. Proizvodnja metalnih prahova 20	20
2.5.3. Svojstva materijala dobivenih metalurgijom praha 22	22
2.5.3.1. Kemijska svojstva praha 23	23
2.5.3.2. Fizikalna svojstva praha..... 23	23
2.5.3.3. Tehnološka svojstva praha 24	24
2.5.4. Kompaktiranje praha..... 26	26
2.5.4.1. Jednoosno kompaktiranje..... 26	26
2.5.4.2. Hladno izostatsko prešanje 27	27
2.5.4.3. Toplo izostatsko prešanje..... 29	29
2.5.4.4. Ekstrudiranje 31	31
2.5.5. Sinteriranje..... 31	31
3. Eksperimentalni dio 33	33
3.1. Izrada uzoraka 33	33
3.1.1. Prahovi 33	33
3.1.2. Kompaktiranje prahova..... 34	34

3.2. Analiza strukture	37
3.3. Ispitivanje električnih svojstava	40
3.3.1. Kontaktni otpor	40
3.3.2. Strujno temperaturna karakteristika	44
3.3.3. Termovizija spoja	46
4. ZAKLJUČAK	48
LITERATURA	49
PRILOZI	51

POPIS SLIKA

Slika 1. Odnos cijena aluminija i bakra.....	5
Slika 2. CO ₂ laser	8
Slika 3. Nd:YAG laser	8
Slika 4. Presjek laserskog zavara Al i Cu.....	9
Slika 5. Shematski prikaz postupka spajanja rotacijskim trenjem	10
Slika 6. Spoj Al i Cu postupkom zavarivanja rotacijskim trenjem	11
Slika 7. Postupak elektromagnetskog spajanja	12
Slika 8. Uvećani prikaz spoja Al i Cu elektromagnetskim spajanjem	13
Slika 9. Elektromagnetski spojeni cjevasti profili Al-Cu.....	14
Slika 10. Elektromagnetski spojeni limovi Al-Cu	14
Slika 11. Postupak lemljenja	15
Slika 12. Zalemljeni spoj aluminija i bakra.....	16
Slika 13. Postupak laserski induciranog prevlačenja	17
Slika 14. Al-Cu traka nakon postupka laserski induciranog prevlačenja.....	17
Slika 15. Faze konvencionalnog postupka PM	19
Slika 16. Podjela i fizikalna svojstva čestica praha.....	23
Slika 17. Jednoosno kompaktiranje.....	27
Slika 18. CIP postupak	28
Slika 19. CIP postupak s nepomičnim čepom.....	28
Slika 20. HIP postupak.....	30
Slika 21. Ekstrudiranje praha	31
Slika 22. Faze sinteriranja praha	32
Slika 23. Al prah.....	33
Slika 24. Cu prah.....	33
Slika 25. Hidraulička preša	34
Slika 26. Sipanje praha u kalup	35
Slika 27. Uzorci u elastomernoj vrećici	35
Slika 28. Cilindar s uljem pripremljen za CIP	35
Slika 29. Uzorci u Al foliji nakon CIP-a.....	35
Slika 30. Uzorak čistog Cu.....	36
Slika 31. Uzorak čistog Al	36
Slika 32. Uzorak s naglim prijelazom	36
Slika 33. Uzorak s postupnim prijelazom	36
Slika 34. Uzorak pomiješanih prahova	37
Slika 35. Spoj s naglim prijelazom između Al i Cu, povećanje 100x.....	38
Slika 36. Spoj s postupnim prijelazom između Al+Cu i Cu, povećanje 100x	38
Slika 37. Spoj s postupnim prijelazom između Al i Al+Cu, povećanje 100x.....	38
Slika 38. Uzorak pomiješanih prahova u omjeru 50:50, povećanje 100x.....	39
Slika 39. Uzorak čistog Cu, povećanje 200x	39
Slika 40. Shematski prikaz naponskog spoja kod UI metode	40
Slika 41. Kristalna zrna Al sa slojem oksida na površini.....	43
Slika 42. Uključci i nečistoće u uzorku čistog Al, povećanje 45x	43
Slika 43. Graf strujno-temperaturne karakteristike Al žice.....	44
Slika 44. Izgled površine uzorka nakon ispitivanja pri struji od 1 A, povećanje 45x.....	45
Slika 45. Izgled površine uzorka Cu nakon ispitivanja pri struji od 1 A, povećanje 100x	45

Slika 46. Oprema za termoviziju.....	46
Slika 47. Termovizija Al-Cu spoja pri struji od 1 A	47
Slika 48. Termovizija Al-Cu spoja pri struji od 5 A	47

POPIS TABLICA

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva aluminija	3
Tablica 2. Fizikalna i mehanička svojstva bakra.....	4
Tablica 3. Postupci proizvodnje prahova i njihova primjena.....	21
Tablica 4. Iznosi otpora prve šarže uzoraka u $m\Omega$	41
Tablica 5. Iznosi otpora druge šarže uzoraka u $m\Omega$	42

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
E	N/mm^2	Modul elastičnosti
G	$\text{m}/\Omega\text{mm}^2$	Električna vodljivost
I	A	Struja
l	m	Duljina
R	Ω	Kontaktni otpor
R_m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
s	m^2	Poprečni presjek
T_t	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura tališta
U	V	Napon
α	$10^{-6} / \text{K}$	Toplinska rastezljivost
ε	%	Istezljivost
λ	W/mK	Toplinska vodljivost
λ	μm	Valna duljina
ρ	kg/m^3	Gustoća
ρ_{Cu}	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	Električna otpornost bakra
ρ_{Al}	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	Električna otpornost aluminija

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
CIP	<i>Cold isostatic pressing</i> (Hladno izostatsko prešanje)
FCC	Plošno centrirana kubična kristalna rešetka
FSW	<i>Friction stir welding</i> (Zavarivanje rotacijskim trenjem)
HIP	<i>Hot isostatic pressing</i> (Toplo/vruće izostatsko prešanje)
MPL	<i>Magnetic pulse welding</i> (Elektromagnetsko pulsno zavarivanje)
Nd:YAG	Laser s jezgrom od itrij-aluminijevog granata dopiranog atomima neodimija
PM	<i>Powder metallurgy</i> (Metalurgija praha)
P320, P500	Veličina granula abraziva brusnog papira po ISO normi

SAŽETAK

Spajanje materijala različitih svojstava poput aluminija i bakra moguće je postići tehnologijom metalurgije praha. U ovom radu analiziran je problem spajanja bakra i aluminija te su navedeni postupci koji se koriste za njihovo spajanje. Opisane su vrste i postupci metalurgije praha koji se primjenjuju. U eksperimentalnom dijelu izrađeni su uzorci aluminija i bakra primjenom metalurgije praha s kompaktiranjem pomoću hladnog izostatskog prešanja u ulju. Prije prešanja prahovi su bili usipani u elastični kalup s naglim prijelazom između njih, potom uzorci postepenog prijelaza između prahova s pomiješanom zonom te potpuno pomiješanim prahovima. Nakon hladnog izostatskog prešanja na njima se vršila obrada odvajanjem čestica kako bi uzorci bili pogodni za analizu mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu. Potom su na uzorcima provedena ispitivanja električnih svojstava poput kontaktnog otpora te termovizije spoja pri protjecanju struje kroz uzorak.

Ključne riječi: aluminij, bakar, metalurgija praha, CIP, Al-Cu spoj, kontaktni otpor, termovizija spoja

SUMMARY

Connecting materials of different properties such as aluminum and copper can be achieved by powder metallurgy technology. This study analyzes the problem of copper and aluminium joining and the processes already used for their joining. Described are the types and methods of powder metallurgy. In the experimental part aluminum and copper samples were made using powder metallurgy with compacting by cold isostatic pressing. Before pressing, the powders were put into an elastic mold with a straight gradation between them, followed by samples with a mixed zone between the powders and completely blended powders. After the cold isostatic pressing process the samples were shaped on a milling cutter to make them suitable for microstructure analysis on a microscope. Afterwards on the samples were measured some electrical properties such as contact resistance and thermovision of the sample connected to an electrical current flow.

Key words: aluminium, copper, powder metallurgy, CIP, Al-Cu joining, contact resistance, thermovision

1. UVOD

Konvencionalni postupci spajanja materijala poput zavarivanja ne mogu efikasno spojiti materijale različitih mehaničkih, električnih i toplinskih svojstava, a ujedno biti i isplativi. Spajanje raznorodnih metala posebno je primjenjivo u autoindustriji, te zrakoplovnoj i svemirskoj industriji gdje se kombinacijom dobrih svojstava pojedinog materijala mogu dobiti superiorniji proizvodi. Jedna od aktualnih primjena spoja takvih materijala razvija se u automobilima na električni pogon, gdje se pokušava smanjiti velika masa baterijskog paketa i električnih vodova da bi se smanjila potrošnja i povećao domet automobila.

Konstantnim rastom industrije dolazi i do smanjenja zaliha vrijednih tehničkih materijala kojima sukladno tome raste cijena. Potraga za novim materijalima koji bi imali zadovoljavajuća svojstva, naročito u električnoj industriji, intenzivnija je nego ikad u vremenu modernih tehnologija i korištenjem električne energije u svim segmentima života. Metalurgija praha je tehnologija koja ima široku primjenu u strojarскоj i građevinskoj industriji, ali je relativno nova s primjenom u električnoj i sličnim granama industrije. Upotrebom mehaničke sile pri kompaktiranju praha svojstva izvornog materijala se ne mijenjaju te je moguće izraditi uzorke koji će kvalitetom parirati proizvodima napravljenim konvencionalnim postupcima uz vidno manju cijenu.

2. Spajanje aluminija i bakra

2.1. Aluminij

Aluminij je sjajan metal srebrno-bijele boje. Izuzetno je svestran i vrijedan materijal zbog svoje male gustoće, izdržljivosti i fleksibilnosti. Također je metal visoke čvrstoće i visoke otpornosti na koroziju zahvaljujući tankom sloju oksida koja se formira na njegovoj površini. Dobar je električni i toplinski vodič i po toj osobini nalazi se odmah iza srebra i bakra, a po cijeni je uvelike jeftiniji i dostupniji. Naročito se koristi kao električni vodič za struju u električnoj mreži, kada se radi o velikim poprečnim presjecima provodnika kao što su strujne šine i kablovi za uzemljenje [1].

Godišnjom potrošnjom od oko 50 milijuna tona, aluminij je najčešće korišteni neferitni materijal. Razlog tomu su njegova dobra mehanička, fizikalna i kemijska svojstva u odnosu na ostale neferitne materijale. Neka od njih navedena su ispod:

- Povoljan omjer čvrstoće i gustoće (R_m/ρ), posebno kada se koristi u obliku legura. Gustoća čistog aluminija je 2700 kg/m, što je oko jedne trećine gustoće ugljičnog čelika (7850 kg/m), pa se iz tog razloga aluminij sve više koristi u proizvodnji zrakoplova, automobila i ostalih prijevoznih sredstava gdje postoji velika tendencija smanjivanja mase kako bi se smanjila potrošnja energije. Čvrstoća kod aluminija može se još dodatno povećati na tri načina: legiranjem odnosno precipitacijskim očvršćućem, toplinskom obradom i deformacijom, te na taj način možemo dobiti čvrstoću koja doseže vrijednosti čvrstoće čelika [2].
- Dobra električka vodljivost – iako bakar ima bolju električnu vodljivost od aluminija, aluminij ima bolji omjer električne vodljivosti i gustoće (najbolji među svim materijalima), a isto tako ima i znatno nižu cijenu od bakra. Iz tih razloga aluminij sve više zamjenjuje bakar u prijenosu električne energije, naročito kod prijenosa energije na velike udaljenosti kao što je to kod dalekovoda [2].
- Dobra korozijska postojanost – zbog svog velikog afiniteta prema kisiku, površina aluminija prekriva se pasivnim slojem oksida koji štiti površinu od korozije u mnogim korozivnim sredinama [2].
- Dobra oblikovljivost – aluminij zbog svoje plošno centrirane kristalne rešetke (FCC) izvanredno je toplo i hladno oblikovljiv [2].

- Toplinska vodljivost – nelegirani aluminij posjeduje odličnu toplinsku vodljivost koja iznosi otprilike 60 % toplinske vodljivosti bakra. Legiranjem toplinska vodljivost se smanjuje ali je i dalje vrlo dobra. Postoji mnogo aplikacija gdje se traži dobra toplinska vodljivost pa se često aluminij koristi kod proizvodnje izmjenjivača topline, raznih hladnjaka i slično [3].

U tablici 1 prikazana su neka bitna tehnička svojstva aluminija.

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva aluminija [2]

Gustoća	ρ	kg/m ³	2700
Talište	T_t	°C	660
Modul elastičnosti	E	N/mm ²	69000
Toplinska rastezljivost	α	10 ⁻⁶ /K	23,8
Električna vodljivost	G	m/Ωmm ²	26...37,8
Toplinska vodljivost	λ	W/mK	205...250
Vlačna čvrstoća*	R_m	N/mm ²	40...180
Istezljivost*	ε	%	50...4

*ovisno o stanju

Aluminij je paramagnetičan materijal što je svojstvo bitno za električnu i elektroničku industriju. Nije piroforan što je bitno pri primjeni sa zapaljivim i eksplozivnim materijalima. [4]

2.2. Bakar

Čovjek koristi bakar i bakrove legure (bronce i mjedi) već od davnine (brončano doba). Danas se on pretežno upotrebljava u elektrotehnici, dok se konstrukcijski materijali u strojogradnji i brodogradnji koriste uglavnom njegove legure [2].

Osnovna svojstva bakra su prvenstveno najbolja toplinska i električna vodljivost među metalima, izuzev srebra na volumnoj osnovi, otpornost na koroziju i dobra oblikovljivost. Vlačna čvrstoća, otpornost na puzanje, umor, korozijska postojanost i livljivost mogu se poboljšati legiranjem, ali se pri tome smanjuju njegova električna i toplinska vodljivost [2].

U Tablici 2 prikazana su svojstva bakra bitna za tehničku primjenu.

Tablica 2. Fizikalna i mehanička svojstva bakra [2]

Gustoća	ρ	kg/m ³	8930
Talište	T_t	°C	1083
Modul elastičnosti	E	N/mm ²	125000
Toplinska rastezljivost	α	10 ⁻⁶ /K	17
Električna vodljivost	G	m/Ωmm ²	35...58
Toplinska vodljivost	λ	W/mK	240...386
Vlačna čvrstoća*	R_m	N/mm ²	200...360
Istezljivost*	ε	%	2...45

*ovisno o stanju

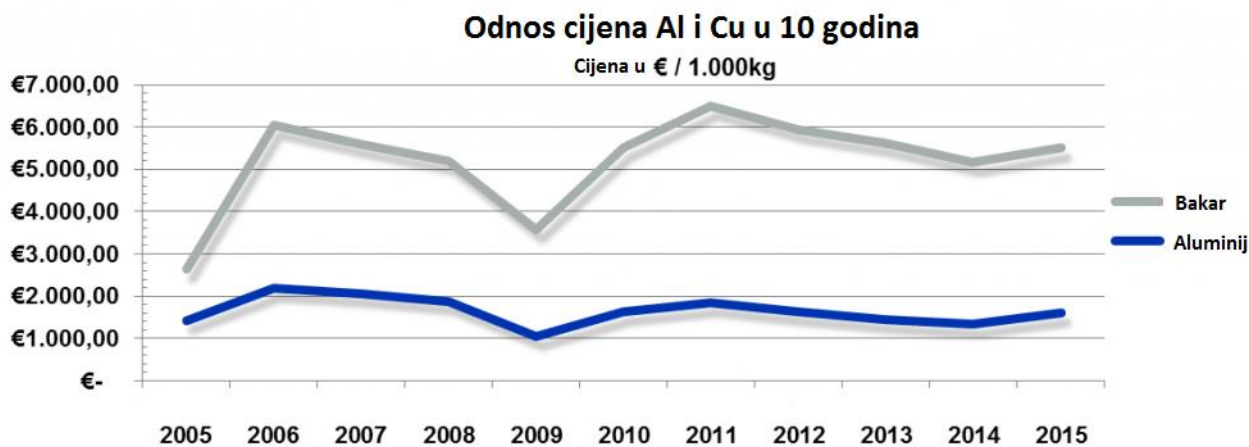
Bakar je metal svijetle crveno-smeđe boje, kubične plošno centrirane kristalne rešetke (FCC). Nije polimorfan. U čistom stanju relativno je mekan, ali vrlo žilav i rastezljiv. Lako se kuje, valja (na hladno i vruće) i izvlači u vrlo tanke žice. Može se meko i tvrdo lemiti i zavarivati. Relativno je postojan na zraku, a izlaganjem utjecaju atmosferilija dobiva zeleno-bijelu patinu (malahit) koja ga štiti od daljnje oksidacije. Patina može biti i drukčijeg kemijskog sastava (hidroksisulfat, hidroksiklorid), ovisno o čistoćama u atmosferi [5].

Zbog izuzetno visoke električne i toplinske vodljivosti, otpornosti prema koroziji i dobrih mehaničkih svojstava bakar ima vrlo široku primjenu, naročito u elektrotehnici. Većina električnih vodova (osim dalekovoda gdje se koriste aluminij i čelik jer je bakar preskup i ne odgovara namjeni) izrađuje se od bakra. Služi za izradu grijača, isparivača, cijevi i kotlova u prehrambenoj industriji. U građevinarstvu se primjenjuje za izradu velikih pokrova koji, zbog svojstava bakrene patine, imaju veliku trajnost i specifičan izgled. U metalurgiji ima veliku primjenu kao legirajući metal [5].

2.3. Usporedba svojstava aluminija i bakra

Neke razlike u svojstvima aluminija i bakra koje su bitne za elektroničku industriju su:

- Aluminij ima gustoću od 2700 kg/m^3 naspram bakra koji ima oko 9000 kg/m^3 , što ga čini 3,3 puta lakšim od bakra.
- Električna vodljivost aluminija je 1,6 puta manja od vodljivosti bakra ($37 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$ naspram $58 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$). Na primjeru, aluminijski vod iste dužine i ukupnog otpora ima 1,6 puta veći presjek nego bakreni [6].
- Aluminij je znatno manje čvrstoće od bakra (40 N/mm^2 naprema 200 N/mm^2). Za razliku od bakra, električna vodljivost aluminija manje ovisi o stupnju tvrdoće [6].
- Linearni koeficijent istezanja je otprilike 40% veći kod aluminija nego kod bakra.
- Iako je temperatura taljenja aluminija ($660 \text{ }^\circ\text{C}$) niža od temperature taljenja bakra ($1083 \text{ }^\circ\text{C}$), kod njega je potrebno unijeti veću energiju zagrijavanja jer ima sloj oksida na površini koji ima višu temperaturu taljenja od samog aluminija ($2050 \text{ }^\circ\text{C}$). Tolika razlika temperatura stvara problem pri toplinskom rezanju i zavarivanju ova dva materijala.
- Elektropotencijal aluminija iznosi -1.67 V , dok je kod bakra $+0.34 \text{ V}$. Kontakt ova dva metala uz prisustvo elektrolita može dovesti do elektrokemijske korozije [7].
- Aluminij je približno tri puta jeftiniji od bakra. Razlog toga je što su količine zaliha bakra uvelike manje i cijena im konstantno varira na svjetskom tržištu (Slika 1).



Slika 1. Odnos cijena aluminija i bakra [8]

2.4. Načini spajanja aluminija i bakra

Postoje inovativne tehnologije kojima se ostvaruju nerastavljivi spojevi materijala s visokim kemijskim afinitetom i potpuno drugačijim fizičkim i mehaničkim svojstvima, kao što su aluminij i bakar. Proizvodnja aluminij-bakar (Al/Cu) hibridnih sustava omogućuje razvoj novih inženjerskih rješenja koja kombiniraju poboljšane mehaničke, toplinske i električne značajke bakra s niskom specifičnom gustoćom i cijenom aluminija. Međutim, iako su neki eksperimenti spajanja aluminija i bakra već provedeni, način efikasnog i pristupačnog spajanja tih metala još nije postignut i nekoliko pitanja još uvijek zahtijevaju opsežna istraživanja [10].

U primjeni za manje serije su sljedeći postupci spajanja aluminija i bakra:

- Postupak laserskog zavarivanja
- *Friction stir welding* (FSW) - Postupak zavarivanja rotacijskim trenjem
- *Magnetic pulse welding* (MPL) - Postupak elektromagnetskog spajanja
- Postupak tvrdog lemljenja
- *Laser induction roll plating* - Postupak laserski induciranog prevlačenja

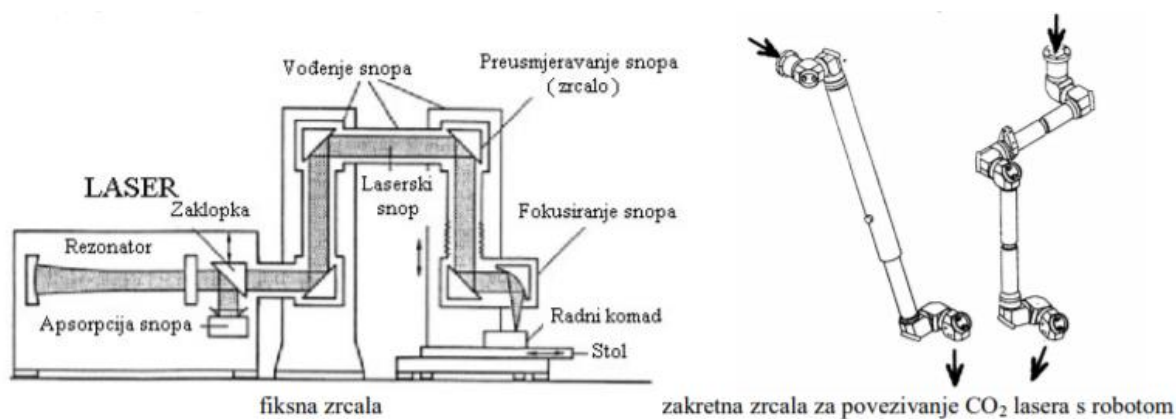
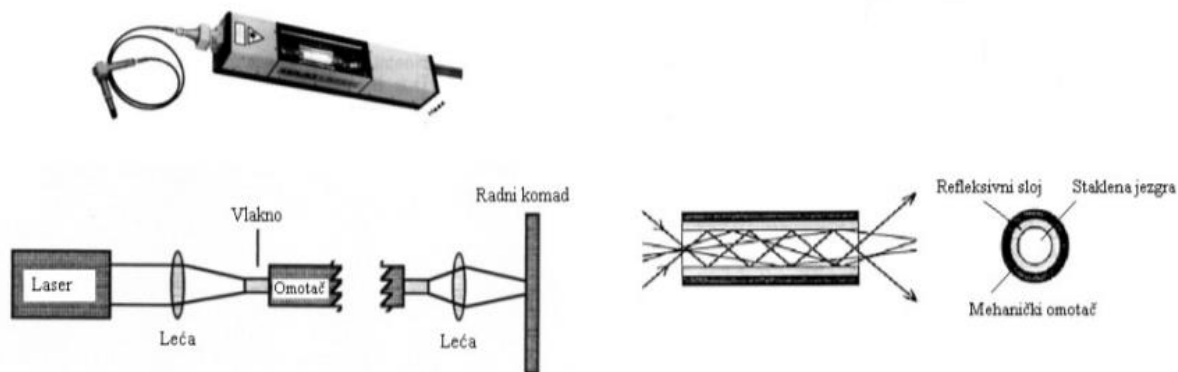
2.4.1. Lasersko zavarivanje

Zavarivanje laserom izvodi se u atmosferi zaštitnog plina (Ar, He, N₂, CO₂ ili mješavina). Laserska emisija svjetlosti djeluje koncentrirano i uzrokuje velike brzine zagrijavanja i hlađenja zavarenog spoja. Brzina zavarivanja može biti od 1 m/min do 10 m/min, a unos topline na mjesto zavora i deformacija materijala je relativno mali. Laserski snop može biti kontinuirani i pulsni, ovisno o zahtjevima konstrukcije, materijalu, tipu i geometriji spoja. U kontinuiranom načinu rada emitira se laserska zraka kontinuirane, relativno niže, snage tijekom čitavog procesa. U pulsnom načinu rada moguće je ostvariti vrlo veliku snagu u kratkim vremenskim intervalima. Tehnika zavarivanja laserom primjenjuje se kod konstrukcija visoke vrijednosti, što zahtjeva automatizaciju i robotizaciju procesa [11].

2.4.1.1. Vrste lasera

Lasери se razlikuju prema vrsti aktivnog laserskog materijala u kojem se događa pojačanje svjetlosti. Za zavarivanje i rezanje upotrebljavaju se CO₂ i Nd:YAG laseri, koji su dobili ime prema vrsti aktivnog materijala. Karakteristika svakog lasera je valna duljina emitirane svjetlosti (λ), koja je funkcija razlike energetske stanja atoma/molekula aktivnog medija. CO₂ – plinski laser (aktivni materijal je mješavina plinova N₂, He, CO₂), emitira infracrvenu svjetlost valne duljine od 10,6 μ m i snage do 45 kW. CO₂ laser koristi se pretežno za rezanje, ali i za zavarivanje. Nd:YAG kruti laser (aktivni materijal je Nd:YAG kristal), emitira infracrvenu svjetlost valne duljine 1 μ m i snage do 6 kW. Nd:YAG laser koristi se za označavanje, zavarivanje i rezanje elektroničkih komponenti te u mikromehanici. Povećanjem snage lasera preko 1 kW sve je češća primjena ovih lasera za zavarivanje i rezanje debljih strukturnih elemenata. Valne duljine oba lasera nalaze se u infracrvenom području, pa tako nisu vidljive okom. Za pozicioniranje se koristi HeNe - plinski laser koji emitira vidljivu crvenu svjetlost ($\lambda=0,632 \mu$ m) [11].

Laserski snop nastao u laseru (rezonatoru) može se voditi do radnog komada na dva načina: sustavom zrcala i leća (CO₂), prikazan na slici 2 i optičkim vlaknima (Nd:YAG), prikazanim na slici 3. Laserski snop iz Nd:YAG lasera provodi se kroz fleksibilni optički kabel sa staklenom jezgrom promjera od 0,4 mm do 1 mm. Na kraju optičkog kabela dužine i do 200 m nalazi se obradna glava u koju je smještena optika za fokusiranje snopa na površinu radnog komada. Laserski snop kod CO₂ lasera mora se voditi sustavom zrcala, jer je staklena jezgra optičkog kabela nepropusna za svjetlost njegove valne duljine. Materijal jezgre optičkog vlakna koji bi bio propustan za snop CO₂ lasera još nije pronađen. Relativno gibanje između snopa i radnog komada mora biti upravljano, a pritom se može gibati snop, radni komad ili oba. Prednost vođenja snopa optičkim kabelom je jednostavnije povezivanje lasera s robotom [11].

Slika 2. CO₂ laser [11]

Slika 3. Nd:YAG laser [11]

2.4.1.2. Prednosti i nedostatci laserskog zavarivanja

Prednosti lasera pred ostalim postupcima zavarivanja:

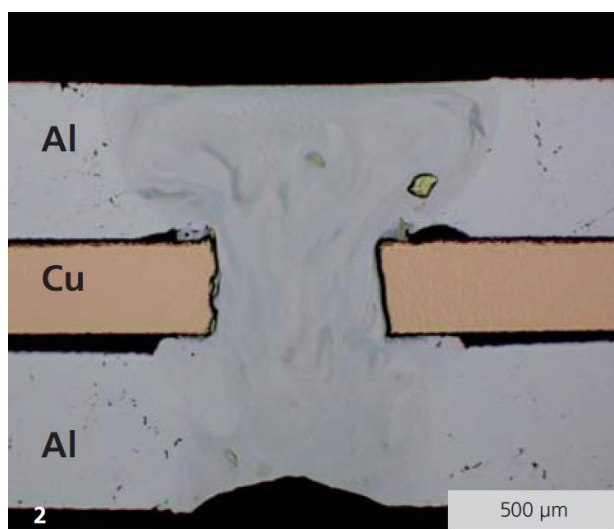
- velika brzina rada
- radi s konstantnom, visokom i ujednačenom kvalitetom
- mali ili nikakav utjecaj topline na okolni materijal
- nema kontakta s radnim komadom
- fleksibilnost i ekonomičnost i kod proizvodnje manjih serija
- visoki stupanj automatizacije

Nedostatci lasera:

- visoka cijena opreme
- zahtijeva precizno pozicioniranje radnog komada i precizno vođenje snopa
- mali stupanj iskorištenja

2.4.1.3. Lasersko zavarivanje aluminija i bakra

Lasersko zavarivanje je postupak koji kombinacijom određenih parametara može veoma efikasno spojiti materijale različitih mehaničkih i toplinskih karakteristika, kao što je slučaj s aluminijem i bakrom. Problem stvaraju intermetalne faze koje se generiraju na spojnog mjestu, te dovode do smanjenja kvalitete spoja. One se mogu djelomice ukloniti primjenom dinamičkog svjetlosnog snopa. Na slici 4 je prikazan presjek laserski zavarenog spojnog mjesta aluminija i bakra.



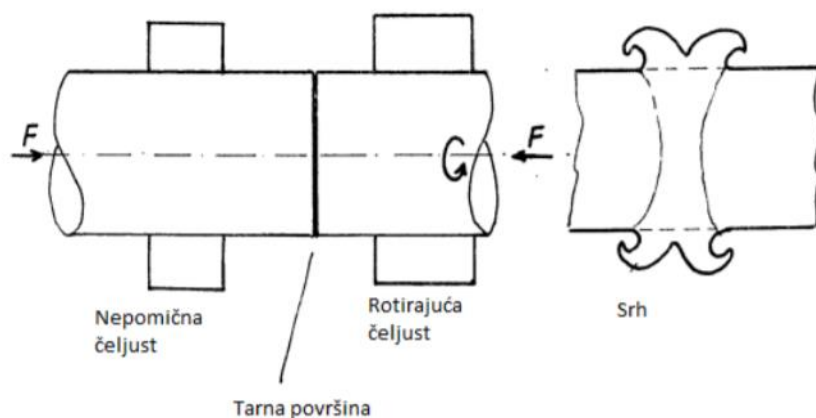
Slika 4. Presjek laserskog zavara Al i Cu [12]

Ovim postupkom se zavaruju kontaktna Al-Cu mjesta u proizvodnji Li-ion baterijskih ćelija, kao i ostali tankostjeni dijelovi u elektroničkoj industriji. Postupak može kombinirati i više različitih materijala kao što su Al i Mg, nehrđajući čelik i Cu i drugi [12].

2.4.2. Zavarivanje rotacijskim trenjem

FSW (eng. *Friction stir welding*) ili zavarivanje trenjem je vrsta zavarivanja pritiskom, u kojem se dijelovi među dodirnim površinama zagrijavaju toplinom trenja koja nastaje rotacijom jednog ili oba dijela koji se zavaruju, nakon čega slijedi zavarivanje većim pritiskom na dijelove, a da pritom rotacija prestaje. Zavari su rotacijski simetrični, a kod ovakvog tipa spajanja postoji više načina zavarivanja. Prvenstveno se zavaruju metali i njihove legure, ali također se mogu zavarivati i polimeri. Ovaj tip zavarivanja je pogodan u mnogim industrijskim granama kao što su automobilska za zavarivanje ventila, čepova, svrdla, vratila, itd. Jedna od najistaknutijih prednosti ovog postupka je ta da je zona utjecaja topline vrlo uska [13].

Postupak je prikazan na slici 5.



Slika 5. Shematski prikaz postupka spajanja rotacijskim trenjem [13]

Zavarivanje trenjem se odvija kroz 4 koraka [14]:

- Radni komad se rotira, a drugi miruje
- Kada se dostigne prikladna rotacijska brzina, komadi se dovode u dodir i pritišću s aksijalnom silom
- Trenjem između komada lokalno dolazi do zagrijavanja i počinje miješanje materijala
- Rotacija prestaje i miješanje materijala je završeno

2.4.2.1. Prednosti i nedostatci zavarivanja rotacijskim trenjem

Prednosti zavarivanja trenjem [15]:

- Nije potreban dodatni materijal niti zaštitna atmosfera
- Čistoća površine nije toliko bitna u usporedbi s drugim procesima zavarivanja,
- Uska zona utjecaja topline i male deformacije materijala
- Zavarivanje trenjem je prikladno za zavarivanje većine konstrukcijskih materijala i pogodno je za spajanje raznorodnih materijala
- U većini slučajeva, čvrstoća zavareske veze je veća od čvrstoće manje čvrstog materijala u spoju
- Operateri ne moraju biti obučeni za ručno zavarivanje
- Postupak se lako automatizira za serijsku proizvodnju
- U usporedbi s ostalim postupcima zavarivanja, zavarivanje trenjem je izuzetno brzo

Nedostatci zavarivanja trenjem [15]:

- Jedan od radnih komada mora biti osno simetričan i mora biti sposoban rotacijski se gibati oko osi simetrije
- Priprema i poravnavanje tarne površine imaju značajan utjecaj kod obradaka s promjerom većim od 50 mm
- Osnovna oprema i alati su skupi
- Ako su oba obratka duža od jednog metra potrebna je posebna oprema
- Strojno neobrađene površine je teško zavarivati

Slika 6 prikazuje aluminijski i bakreni cilindrični profil spojen primjenom rotacijskog trenja.

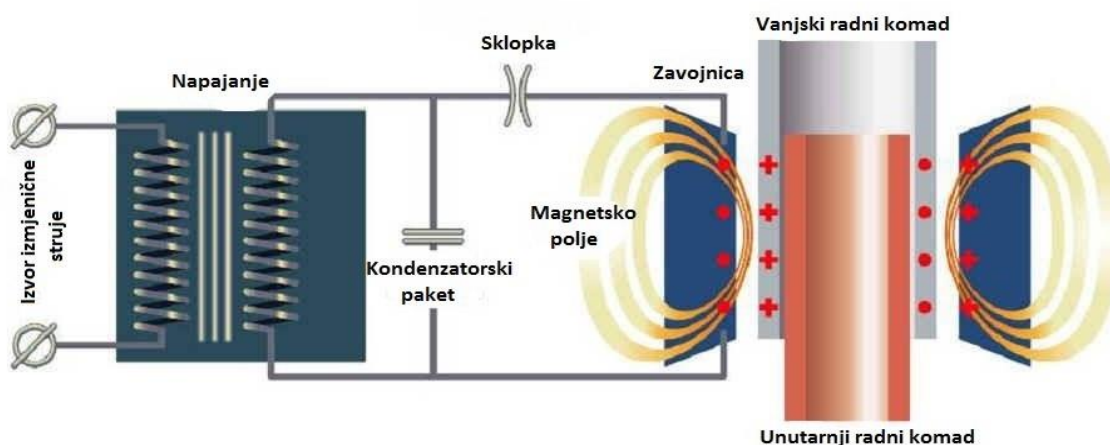


Slika 6. Spoj Al i Cu postupkom zavarivanja rotacijskim trenjem [6]

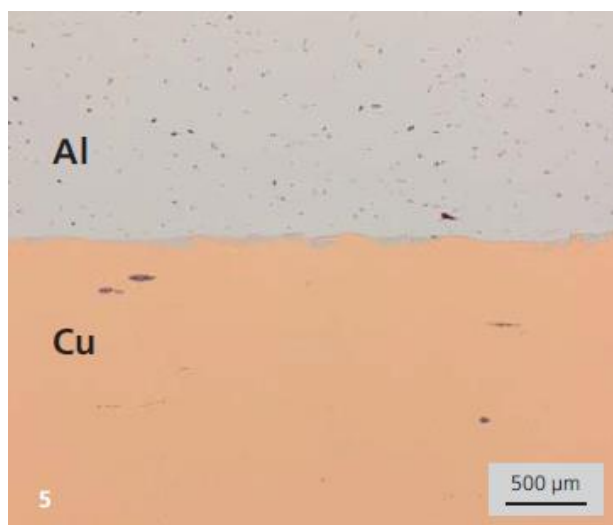
2.4.3. Elektromagnetsko pulsno spajanje

Elektromagnetsko zavarivanje ili zavarivanje magnetski pokretanim električnim lukom (MPL; eng. *Magnetic pulse welding*) je postupak zavarivanja koji se ostvaruje pritiskom, nakon omekšavanja osnovnog materijala (npr. dviju cijevi), uslijed djelovanja električnog luka, koji se rotira u zazoru žlijeba za zavarivanje. Rotacija električnog luka je rezultat djelovanja suprotnih magnetskih polja na cijevima koje se zavaruju. Velikom privlačnom silom različitih magnetskih polova materijali se trajno zavare na atomskoj razini [16].

Osnovno načelo postupka prikazano je na slici 7. Radni dijelovi su smješteni unutar zavojnice, a stijenke im ne smiju biti deblje od 4 mm. Velika količina energije se komprimira i ispušta u vrlo kratkim vremenskim intervalima. Neki sustavi na radni komad mogu ispustiti do 2 milijuna ampera u samo 100 mikrosekundi. Visok protok energije u zavojnici koja generira električnu struju inducira tzv. "vrtložne struje" u vanjskom izratku. Protoci struja (u zavojnici i na vanjskom izratku) tvore magnetska polja, koja se protive jedno drugome. Reakcijske sile između suprotnih magnetskih polja pritišću vanjski dio prema unutarnjem dijelu pri velikoj brzini kako bi tvorili zavareni spoj. Brzina spajanja dva materijala je vrlo velika što rezultira trajnom deformacijom radnog komada [17]. Moguće je spojiti razne kombinacije materijala kao npr. aluminij i bakar, što je prikazano na slici 8.



Slika 7. Postupak elektromagnetskog spajanja [17]



Slika 8. Uvećani prikaz spoja Al i Cu elektromagnetskim spajanjem [12]

2.4.3.1. Prednosti i nedostatci spajanja elektromagnetskim pulsom

Prednosti:

- Zavareni dio je izdržljiviji od osnovnog materijala, odnosno tijekom opterećenja materijala pukotine se pojavljuju izvan područja zavara
- Zaštitna atmosfera i drugi dodatni materijali nisu potrebni
- Magnetsko pulsno zavarivanje je "hladan" proces zavarivanja, dijelovi se ne zagrijevaju. Stoga se ne stvara nijedna zona utjecaja topline i nema gubitka materijala. To također znači da se zavareni dijelovi mogu odvojiti odmah nakon zavarivanja i mogu se dalje obrađivati
- Visoka brzina proizvodnje
- To je proces ekološkog zavarivanja jer se ne proizvodi toplina, zračenja ili štetni plinovi
- Pogodno je za spajanje raznorodnih materijala poput bakra i aluminija, čelika i bakra, titana i aluminija i ostalih [12]
- Osim cjevastih profila (slika 9), mogu se zavarivati i tanki limovi, kao što je prikazano na slici 10.



Slika 9. Elektromagnetski spojeni cjevasti profili Al-Cu[18]



Slika 10. Elektromagnetski spojeni limovi Al-Cu [18]

Nedostatci:

- Vrlo skupa oprema i potrošnja električne energije
- Primjena ograničena na cjevaste profile i limove manjih poprečnih presjeka

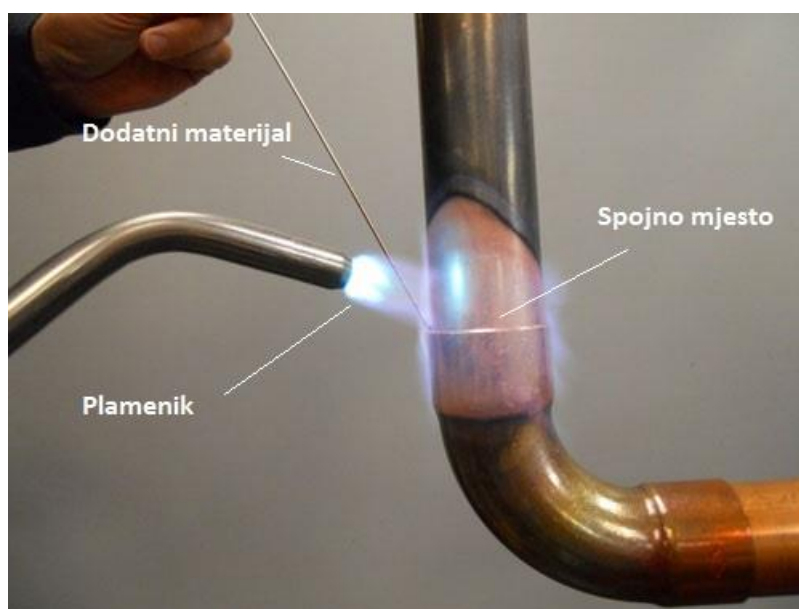
2.4.4. Lemljenje

Lemljenje je postupak spajanja metalnih materijala pomoću rastaljenog dodatnog materijala ili lema, čije je talište niže od tališta osnovnog materijala koji se spaja. Ovisno o temperaturi, razlikujemo „meko“ i „tvrdo“ lemljenje. Kod mekog lemljenja tali se lem s temperaturom nižom od 450 °C, dok je kod tvrdog nešto iznad 450 °C [19].

Područje taljenja nekog lema je područje temperatura od početka taljenja (temperatura solidusa), do potpuno rastaljenog stanja (temperatura likvidusa). Pod radnom temperaturom podrazumijeva se najniža temperatura površine izratka na mjestu lema, na kojoj temperaturi se lem može umrežiti, proširivati i vezati na osnovni materijal izratka.

Radna temperatura mora uvijek biti viša od temperature solidusa, no ipak smije biti ispod ili iznad temperature likvidusa.

Preko granične plohe lem-osnovni materijal odvija se izmjena mjesta atoma, a time i difuzija (legiranje). Zbog toga površine lemljenja moraju biti po mogućnosti glatke (dubina hrapavosti ne preko 20 μm) i dobro očišćene. Da bi se odstranili još postojeći površinski tanki slojevi i da bi lem mogao dobro umrežiti površinu lemljenja, upotrebljavaju se otopine soli (DIN 8511). Upotrebljavaju se i zaštitni plinovi, koji sprječavaju ili smanjuju mogućnost oksidacije površine lemljenja, prije nego što se dostigne radna temperatura [19]. Na slici 11 prikazan je postupak lemljenja bakrenih dijelova.



Slika 11. Postupak lemljenja [20]

2.4.4.1. Prednosti i nedostaci lemljenja

- Lemljenje se može lako mehanizirati i automatizirati, te je zbog toga pogodno za serijsku i masovnu proizvodnju
- Ne tali se osnovni materijal, pa ne dolazi do većih strukturnih promjena
- Vrlo lako se spajaju raznorodni materijali
- Postupak je relativno brz
- Deformacije radnog komada su minimalne
- Nije potrebna naknadna mehanička obrada zalemljenog spoja

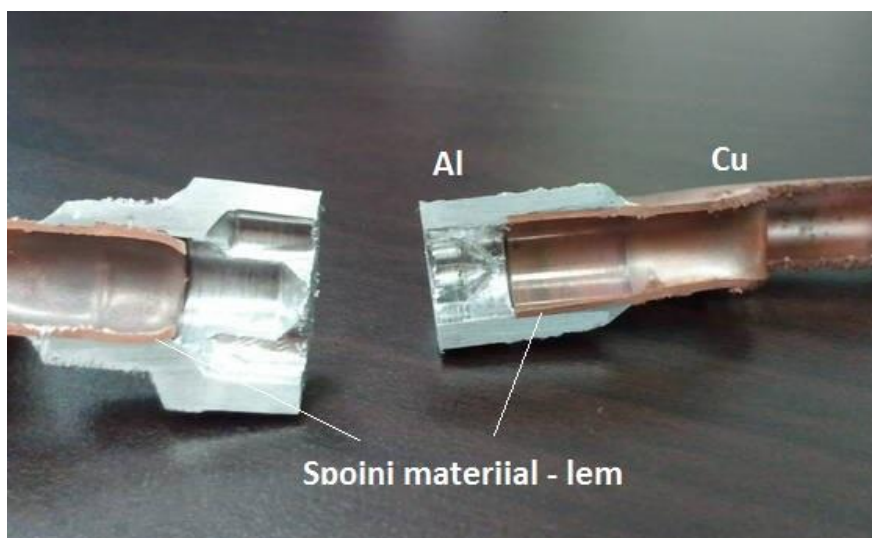
Nedostatci lemljenja:

- Potreban dodatni materijal koji smanjuje neka mehanička i električna svojstva izratka
- Potrebno vrijeme zagrijavanja i hlađenja spojnog mjesta
- Potrebno temeljito čišćenje i priprema površine spojnog mjesta prije lemljenja
- Velika vještina pri spajanju raznolikih materijala (Al i Cu)

2.4.4.2. Lemljenje aluminijske i bakrene cijevi

Pri lemljenju raznorodnih materijala kao što su aluminij i bakar najveći problem stvara različita temperatura tališta. Pri prevelikom vremenu zagrijavanja na spojnog mjestu bakar počne difundirati u aluminij stvarajući tako Al-Cu_{33} spojeve koji imaju niže talište od dodatnog materijala (oko $550\text{ }^{\circ}\text{C}$). U tom slučaju se ne zagrijava spojno mjesto nego se izvor topline usmjeri na bakreni dio koji svojom dobrom toplinskom vodljivošću toplinu predaje aluminiju. Valja voditi računa i o tome da se dovod topline isključi čim se dodatni materijal rastali, kako se aluminij ne bi počeo taliti. Pri tome se koriste lemovi koji su pogodni za takve tipove materijala kao što su Al-Si-Sn i slični [22].

Na slici 12 prikazan je presjek tvrdo lemljenog spoja bakrene i aluminijske cijevi.

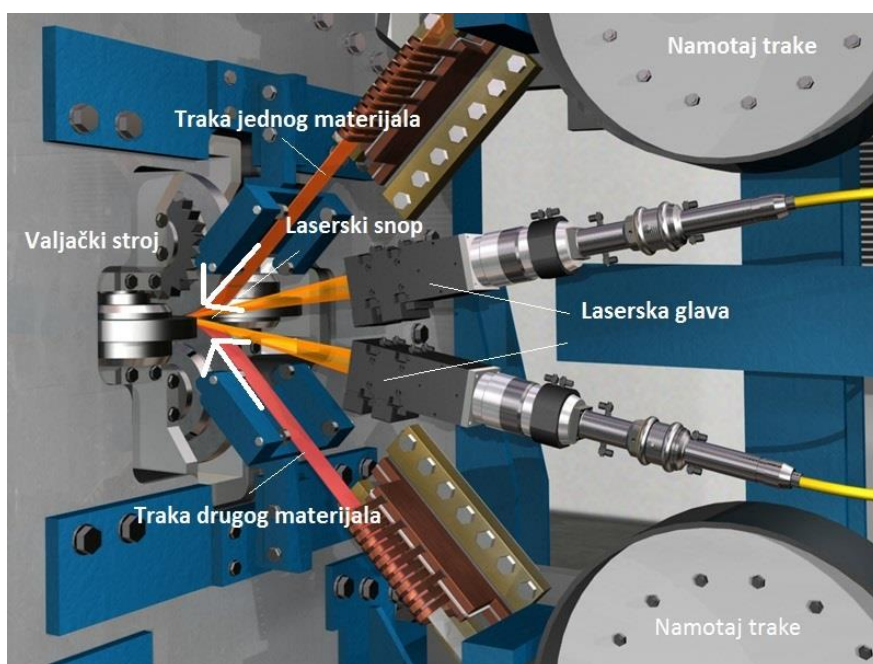


Slika 12. Zalemljeni spoj aluminijske i bakrene cijevi [23]

2.4.5. Laserski inducirano prevlačenje

Laserski inducirano prevlačenje (eng. *Laser induction roll plating*) postupak je toplinskog prevlačenja s naknadnim valjanjem, što znači da kombinira postupak deformacije valjanjem s prethodno laserski induciranim zagrijavanjem spojnog mjesta. Postupak je to koji daje izuzetno dobra mehanička svojstva gotovog proizvoda. U ovom slučaju, aluminijska i bakrena traka se spajaju istosmjernim valjanjem u jednom prolazu s niskom ukupnom deformacijom ($<11\%$) [12]. Postupak je prikazan na slici 13.

Ovaj postupak je vrlo pogodan za proizvodnju npr. bimetalnih konektora (prijelazni zglobovi) kao što je prikazano na slici 14. Lokalni utjecaj deformacija rezultira usporedno veliki stupanj slobode u izradi poluproizvoda i proizvoda koji mogu kombinirati razne vrste materijala a ne moraju biti geometrijski sukladni [12].



Slika 13. Postupak laserski induciranog prevlačenja [24]



Slika 14. Al-Cu traka nakon postupka laserski induciranog prevlačenja [24]

Trake mogu biti širine do 30 mm, a brzina postupka je do 50 m/min što dokazuje njegovu izuzetnu proizvodnost. Mehanička i električna svojstva osnovnih materijala ostaju postojana nakon deformacije. Potrebna je robusna i jako skupa oprema što ovaj postupak čini preskupim za industrijsku primjenu [24].

2.5. Metalurgija praha

Jedan od modernijih postupaka spajanja raznorodnih materijala koji je u sve većem opticaju je svakako i metalurgija praha.

Metalurgija praha (PM; eng. *powder metallurgy*) je novija ekološki prihvatljiva grana moderne industrije. Predstavlja proces u kojem se čvrsti metal, legura ili keramika u obliku čestica praha vrlo malog poprečnog presjeka prevodi u inženjersku komponentu unaprijed određenog oblika i svojstava koja joj omogućuju upotrebu u većini slučajeva bez daljnje obrade [25].

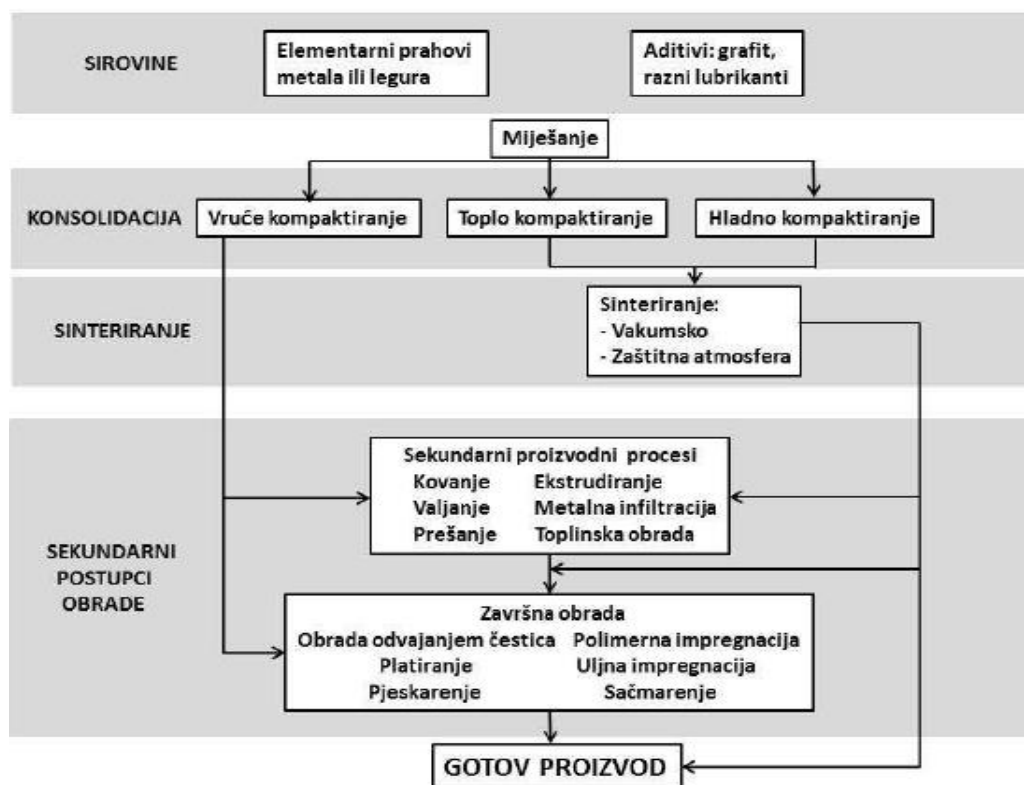
Ova tehnologija omogućava spajanje metala koje nije moguće miješati klasičnim ljevačkim postupcima zbog nedovoljne međusobne topljivosti. Zbog tehnoloških karakteristika postupka moguće je oblikovanje pri nižim temperaturama, pa nije potrebna proizvodnja u zaštitnoj atmosferi, što u konačnici pojednostavljuje i pojeftinjuje proizvodnju [26].

Postupci metalurgije praha mogu se podijeliti u dvije skupine:

- 1) Konvencionalni postupci (eng. *press-and-sinter methods*)
- 2) Postupci kojima se postižu teoretske gustoće (eng. *full density processes*)

Općenito se proizvodnja materijala konvencionalnom metalurgijom praha može raščlaniti u četiri ključne faze prikazane na slici 15 [27]:

- Proizvodnja prahova različitih materijala
- Miješanje praškastih materijala
- Konsolidacija/kompaktiranje
- Sinteriranje



Slika 15. Faze konvencionalnog postupka PM [28]

2.5.1. Prednosti i nedostaci metalurgije praha

Prednosti:

- poboljšana magnetska svojstva
- razvoj materijala novih mikrostruktura
- proizvodnja dijelova gotovog oblika bez naknadne obrade odvajanjem čestica ili sa minimalnom obradom
- točne dimenzije gotovih proizvoda
- oblikovljivost metala koje je nemoguće oblikovati drugim postupcima
- proizvodnja dijelova smjese međusobno netopivih metala, smjese keramike i metala, komponenata u čistom obliku
- proizvodnja dijelova željenog stupnja poroziteta
- zelena tehnologija, ušteda energije i troškova proizvodnje
- pouzdanost procesa i svojstava za kritične primjene
- visok stupanj iskoristivosti materijala
- mogućnost proizvodnje jednostavnih i složenih oblika

Nedostatci:

- visoka cijena polaznih prahova
- skupa i sofisticirana oprema za oblikovanje
- skupa i komplicirana izrada kalupa za oblikovanje praha tijekom kompaktiranja
- stroga kontrola svih segmenata proizvodnje
- otežano rukovanje prahovima
- zahtjeva se skladištenje i rukovanje praha u čistoj okolini kompaktiranja
- mogućnost pojave poroziteta i oksidacije, što rezultira smanjenjem mehaničkih svojstava
- ograničenja oblika i dimenzija gotovih proizvoda
- razlike u gustoći gotovih dijelova u slučaju jednoosnog kompaktiranja
- iskoristivo i ekonomično jedino za velikoserijsku proizvodnju

2.5.2. Proizvodnja metalnih prahova

Prvi korak u procesu metalurgije praha obuhvaća proizvodnju metalnih prahova. Ovo je ujedno i jedna od najvažnijih osnova za cijelo područje ove metalurgije jer za dobivanje sinteriranih proizvoda željenih karakteristika polazna sirovina, odnosno prah metala ili legure često ima presudan značaj [25].

Postoji mnogo načina za dobivanje metalnih prahova, ali se mogu svesti na četiri vrste procesa proizvodnje [25]:

- mehanički
- elektrolitički
- kemijski
- atomizacija

U tablici 3 su navedeni najčešći postupci proizvodnje metalnih prahova s vrstama prahova koji se njima proizvode, veličini čestica te nekim od primjera njihove primjene u privredi.

Tablica 3. Postupci proizvodnje prahova i njihova primjena [25]

Postupak	Prah	Veličina čestica, μm	Primjena
Mehanički	Mn, Mg, Cr, Sb, Bi, Co, Be; Fe, Ti, Zr, Hf, U, Th; WC, TiC, TaC, Co; Ta, Nb, Fe-Al, Fe-Al-Ti, Ni-Al, Ni-Ti, Fe-Cr, Fe-Si; Ni-Fe, Ag, Ag-Sn; superlegure	0,5 - 400	Dijelovi strojeva iz sinteriranog čelika, dijelovi za kemijsku industriju; u nuklearnoj tehnici, porozni ležajevi, tvrdi metali, teškotaljivi metali, sinter magneti, laki metali, amalgami...
Elektrolitički	Fe, Cu, Sn, Pb; Ta, Nb, Ti, Th, Zr, V	0,1 - 30	Kemijska industrija, nuklearna tehnika, porozni materijali, visokovakuumski materijali, sinterirani nosači, sinterirani čelik
Kemijski	Zn, MoO ₃ ; Ni, Fe, Mo, W; Co, Cu; Ag, Au, Pt, Sn; Ta, Nb, Ti, Th, U, Zr, V, Hf, tvrdi metal	0,1 - 50	U nuklearnoj tehnici, bimetalni, vakuumski materijali, sinter magneti, čisti metali, kontakti materijali, u kemijskoj industriji, porozni ležajevi, obojeni metali, kompoziti...
Atomizacija	Fe, Cu, Al, Ni, Ag, Ti, Sn, Zn, Bi, Cd, Au Bronca, mesing, predlegirani i legirani prahovi	10 - 500	Sinter magneti, laki metali, porozni materijali, amalgami, elektromaterijali, sinterirani čelik, nuklearna tehnika, obojeni metali...

Mehaničkim postupcima prahovi se dobivaju usitnjavanjem polaznog materijala djelovanjem vanjskih sila. Čestice ovako dobivenih prahova obično su nepravilnog oblika, a neki od načina mehaničkog usitnjavanja su udarnim djelovanjem, atritiranjem, sječenjem te tlačenjem. Udarno djelovanje sastoji se iz brzog drobljenja materijala, dok se u procesu atritiranja materijal usitnjava trenjem. Sječenje odnosno smicanje je zastupljeno kod materijala ekstremnih tvrdoća, a tlačenjem se materijal usitnjava pomoću sila tlakova. Obično se ova četiri načina međusobno kombiniraju radi postizanja što bolje kvalitete i mikrostrukture [25].

Elektrolitička tehnika je fizikalna metoda dobivanja prahova. Prahovi metala se mogu dobiti taloženjem prahova na katodi nekog metala u procesu elektrolize. Prilagodbom kemijskih i fizikalnih uvjeta tijekom galvanizacije omogućuje se taloženje metala u obliku laganih grudica ili pahuljica koji se vrlo lako mogu usitniti u prah. Glavne prednosti ovoga načina dobivanja prahova su čistoća i veličina čestica. Međutim, elektrolizom se mogu dobiti samo elementarni prahovi koji su vrlo reaktivni i krhki što predstavlja ograničenje ovoga postupka

te je zbog potrebe kontrole i usklađivanja mnogih varijabli ovaj postupak znatno skuplji od ostalih [25,26].

Kemijskim postupcima mogu se dobiti prahovi gotovo svih metala, veličina i oblika čestica koji se reguliraju kontrolom promjenjivih parametara pri samom procesu proizvodnje. Glavni kemijski procesi u metalurgiji praha uključuju redukciju metalnih smjesa kao što su oksidi, karbonati, nitrati ili halogenida s plinovima (najčešće vodikom) ili krutinama [26].

Najvažnija metoda proizvodnje prahova metala je **atomizacija**, proces koji je neovisan o fizikalnim i mehaničkim svojstvima čvrstog materijala. Ima dominantnu ulogu u proizvodnji prahova metala i predlegiranih prahova od aluminija, željeza, bronce i mnogih drugih. Razlog široke primjene je što se ovim postupkom omogućava dobivanje prahova metala izrazito visoke čistoće izravno iz taline. Ovaj proces obuhvaća taljenje, atomizaciju, tj. dezintegraciju taline u kapljice te skrućivanje i hlađenje [25,26].

Koja će se od navedenih metoda proizvodnje praha odabrati, ovisi o dostupnosti sirovina te o konačnoj primjeni proizvoda. Odabir postupka prema konačnoj primjeni ovisi prvenstveno o karakteristikama praha.

2.5.3. Svojstva materijala dobivenih metalurgijom praha

Osim svojstava samog materijala od kojega je prah napravljen, svojstva praha, a time i gotovog konsolidiranog proizvoda ovise i o postupku proizvodnje. Karakteristike praha koje u najvećoj mjeri utječu na svojstva konsolidiranog materijala su:

- kemijska (sastav i čistoća)
- fizikalna (dimenzije i oblik čestica, specifična površina)
- tehnološka (sposobnost sinteriranja, sabijanja i brzina tečenja)

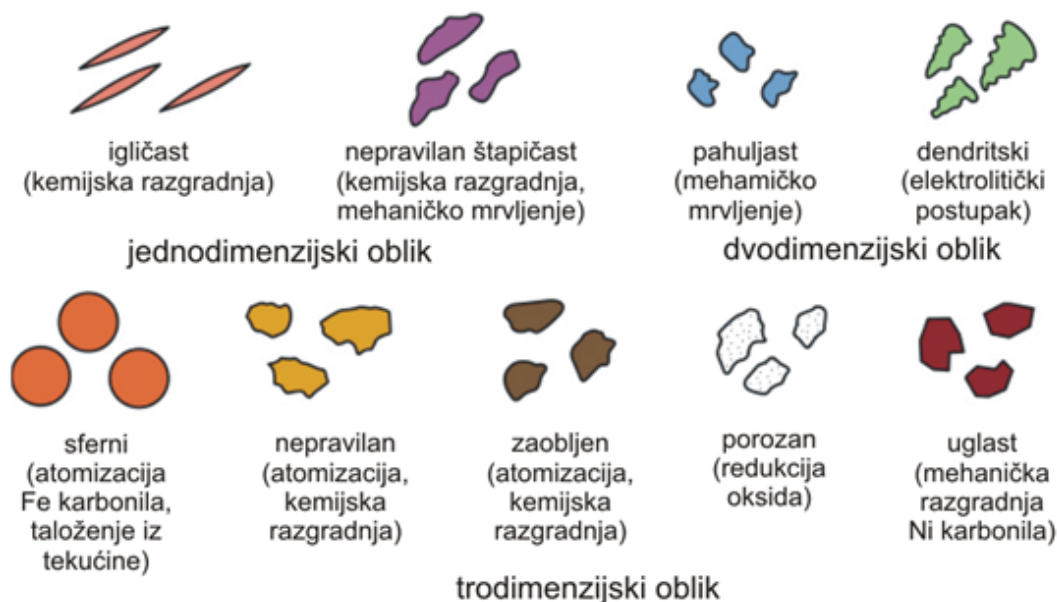
2.5.3.1. *Kemijska svojstva praha*

Kemijski sastav prahova bitan je parametar pri interakcijama čestica praha, ali i ponašanju praha tijekom proizvodnje kompozitnog materijala. Najčešći sastavi materijala prahova su [27]:

- elementarni – prah samo jednog elementa
- smjese – više raznovrsnih elementarnih prahova se miješa što daje mogućnost proizvodnje legura posebnog sastava kakav nije moguće dobiti klasičnim ljevačkim postupcima
- predlegirani prahovi – individualne čestice praha su prethodno legirane, npr. od nehrđajućeg čelika, legura bakra, aluminijskih, brzoreznih čelika...

2.5.3.2. *Fizikalna svojstva praha*

Osnovna fizikalna svojstva čestica praha jesu oblik prikazan slikom 16, veličina čestica te specifična površina. Ona utječu na brzinu tečenja, nasipnu gustoću, stlačivost i mogućnost sinteriranja. Postoje razni oblici čestica praha koji ovise o sirovini i načinu dobivanja praha. Kategoriziraju se u tri osnovne skupine sukladno normi ISO 3252 [29].



Slika 16. Podjela i fizikalna svojstva čestica praha [29]

Specifična površina čestica iznimno je važan parametar pri proizvodnji materijala iz praškastog tipa sirovina. Definirana je kao omjer površine i mase čestica praha. Utjecaj ovog fizikalnog svojstva najizraženiji je tijekom postupka kompaktiranja i sinteriranja kada se upravo na toj ukupnoj površini kontakta odvijaju kemijski i mehanički procesi spajanja čestica praha. Oblik i hrapavost čestica praha ključni su utjecajni parametri na specifičnu površinu praha. Sferne čestice koje imaju puno manju specifičnu površinu pozitivno utječu na tečenje materijala koje je znatno bolje od tečenja čestica dendritičnog oblika. Hrapavost čestica uslijed povećanja međusobnog trenja čestica negativno utječu na tečenje [25].

Dimenzija čestica također utječe na tečenje materijala upravo zbog aspekta specifične površine. Prahovi sa sitnijim česticama imaju puno veću ukupnu specifičnu površinu što kao rezultat ima veći broj kontaktnih točaka među česticama u kojima djeluje međusobno trenje [25].

2.5.3.3. Tehnološka svojstva praha

Tehnološka svojstva praha direktno su vezana uz oblik i dimenzije čestica te obuhvaćaju [25]:

- sposobnost i brzina tečenja
- sposobnost sabijanja
- sposobnost sinteriranja

Svojstva tečenja praha utječe na brzinu punjenja kalupa što u praksi znači više proizvedenih komada u jedinici vremena. Tečenje također utječe na kvalitetu konsolidacije jer se u slučaju lošeg tečenja u potpunosti ne popunjavaju niti praznine u kalupu niti između čestica praha što uzrokuje poroznost, nehomogenost i loše sraščivanje čestica praha, te može dovesti do deformacije proizvoda uslijed sinteriranja [25].

Sposobnost sabijanja je vezana za mogućnost gustog pakiranja čestica praha i obuhvaća dva procesa: komprimiranje i kompaktiranje praha. Komprimiranje praha se odnosi na globalnu stlačivost praha, tj. da se prah sabije i popuni praznine između čestica praha deformacijom i međusobnim pomicanjem čestica. Kompaktiranje je sposobnost praha da zadrži oblik kalupa u koji je sabijen, tj. komprimiran i nakon vađenja iz kalupa i odvođenja na proces sinteriranja.

Općenito, svojstvo sabijanja bi se moglo definirati kao minimalni pritisak potreban za proizvodnju sirovca postojanih dimenzija i oblika ili kao gustoća sirovca nakon kompaktiranja.

Sposobnost sinteriranja je sposobnost ojačanja veze između čestica pod djelovanjem temperature. Pri sinteriranju se smanjuje poroznost i povisuje gustoća obratka. Ono predstavlja sposobnost ojačanja veze između čestica uslijed zagrijavanja tijekom kojeg dolazi do smanjenja poroznosti i porasta gustoće materijala. Kod praškastih materijala postoje tri tipa gustoće [30]:

- Stvarna ili teorijska gustoća- omjer mase materijala i neto volumena materijala nakon taljenja i skrućivanja bez pora.
- Prividna gustoća - omjer mase i volumena bruto nasutih čestica praha s prazninama između čestica praha.
- Gustoća sirovca- gustoća nakon kompaktiranja obično nije zadovoljavajuća pa je nužan dodatni korak termo-mehaničke obrade tijekom koje se postižu jače veze između čestica praha. Gustoća u tom međustanju se zove gustoća sirovca (eng. *green density*) te je puno veća od gustoće praha prije kompaktiranja, no nije jednolika po volumenu i ovisi o pritisku pri kompaktiranju [25].

Poroznost je još jedan pojam blisko vezan uz gustoću prahova a kvantificira se kao omjer pora u ukupnom volumenu materijala koji bitno utječe na svojstva konsolidiranog komada. Udio pora je pritom često teško točno definirati u materijalu zbog nemogućnosti utvrđivanja prisutnosti pora unutar samih čestica praha. Poroznost materijala dobivenih metalurgijom praha ovisi ponajviše o početnoj veličini čestica prahova. Korištenjem manjih čestica osiguravaju se manje dimenzije pora no raste njihova količina u materijalu nakon konsolidacije. Rezultat konsolidacije prahova većih promjera čestica obično je manja količina pora, ali puno većih dimenzija [25].

2.5.4. *Kompaktiranje praha*

Osnovna zadaća postupka kompaktiranja praha jest povezivanje čestica praha u željenu formu. Postupak kompaktiranja praha ostvaruje se primjenom visokog pritiska, posljedica čega je deformacija čestica praha i uklanjanje poroziteta. Pri navedenom postupku vrlo je bitna konstrukcija kalupa, koja će rezultirati željenom čvrstoćom sirovca, kao i točnošću dimenzija. Glavni je problem postupaka kompaktiranja nehomogena gustoća materijala, što u konačnici rezultira razlikama u dimenzijama gotovoga sinteriranog dijela [29].

Osnovni ciljevi postupka kompaktiranja praha jesu [31]:

- konsolidacija praha u željeni oblik
- postizanje željenih konačnih dimenzija
- postizanje željenog stupnja i vrste poroziteta
- postizanje zadovoljavajuće čvrstoće za daljnje rukovanje

Alati za konsolidaciju prahova moraju biti konstruirani na način da podnesu visoke tlakove i temperature te posjeduju visoku otpornost na trošenje. Najčešći postupci konsolidacije su:

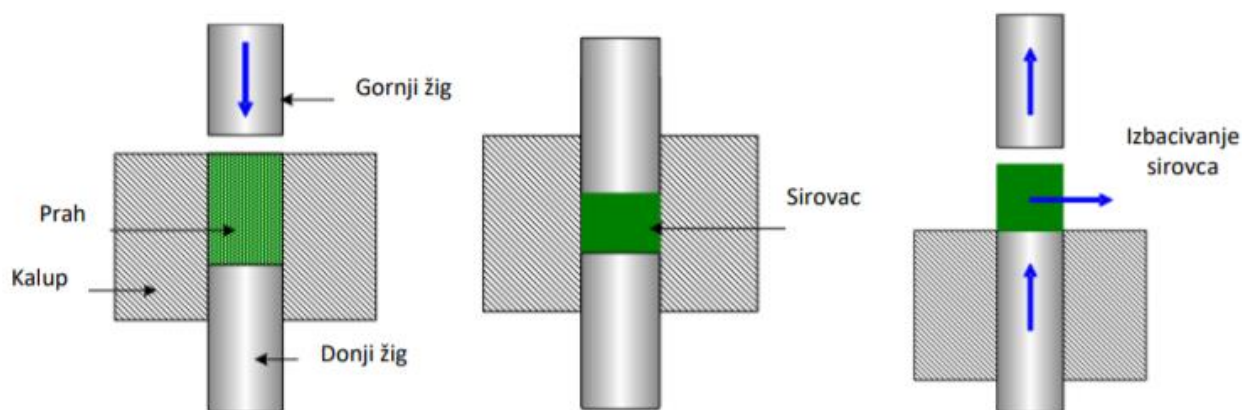
- Jednoosno kompaktiranje
- Hladno izostatsko prešanje
- Toplo (vruće) izostatsko prešanje
- Ekstrudiranje

2.5.4.1. *Jednoosno kompaktiranje*

Postupkom jednoosnog kompaktiranja, kako i samo ime kaže, pritisak na čestice praha prenosi se pomoću žiga koji se pomiče samo po jednoj osi, tj. u vertikalnom smjeru, što stavlja ograničenja na proizvodnju određenih dijelova. Posljedica tečenja praha samo u jednom smjeru jest razlika u vrijednostima gustoće dijelova različite debljine ako se kompaktiranje izvodi samo pomoću jednoga žiga. Kako bi se postigla jednolična gustoća dijelova različite debljine, neophodna je primjena dvostrukih žigova. Razlike u gustoći kompaktiranih dijelova mogu se smanjiti uporabom gornjega i donjega žiga [29].

Postupak jednoosnog kompaktiranja u kalupu sastoji se od sljedećih radnji prikazanih na slici 17:

- popunjavanje kalupa česticama praha
- primjena pritiska putem žiga
- rasterećenje povlačenjem žiga
- izbacivanje sirovca



Slika 17. Jednoosno kompaktiranje [29]

Postoje 2 postupka kompaktiranja, a to su „hladno“ i „toplo“ kompaktiranje. Hladno kompaktiranje odnosno prešanje predstavlja najčešće upotrebljavanu metodu kompaktiranja. Vrijednosti gustoće sirovca kompaktiranog dijela kreću se u rasponu od 75 % do 85 % vrijednosti teoretske gustoće. Toplo kompaktiranje je relativno nov postupak kojim se postiže znatno poboljšanje mehaničkih i fizikalnih svojstava te vrijednosti gustoće kompaktiranih dijelova do 92 %.

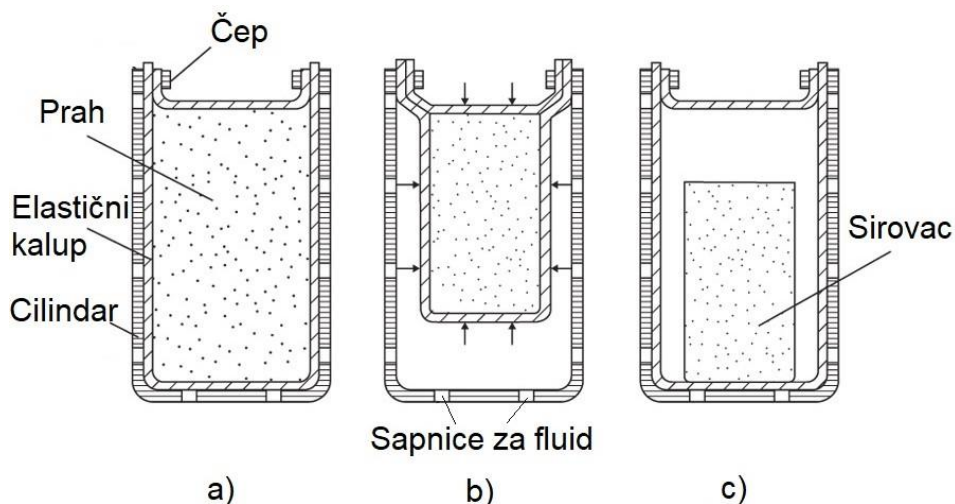
2.5.4.2. Hladno izostatsko prešanje

Hladno izostatsko prešanje (CIP; eng. *cold isostatic pressing*) jest postupak kompaktiranja praha primjenom pritiska jednolično iz svih smjerova. Tlak se primjenjuje kroz tekući medij, najčešće vodu ili ulje, pri sobnoj temperaturi. Pri postupku koristi se fleksibilna membrana kako bi se izolirao prah od tekućine koja se koristi kao medij za tlačenje, a ujedno i osigurala stabilnost oblika konačnog proizvoda. Tipični materijali koji se koriste za izradu kalupa jesu: lateks, neopren, uretan, polivinil klorid i drugi elastomeri [25]. Tlak se postiže spuštanjem čepa u cilindru s medijem.

Tijekom procesa zgušnjavanja kalup se pomiče zajedno s prahom, posljedica čega je smanjenje utjecaja trenja. Upravo zbog smanjenja utjecaja trenja postižu se jednoličnije gustoće u usporedbi s klasičnim jednoosnim kompaktiranjem u kalupu. Vrijednosti primijenjenog tlaka kreću se u rasponu od 100 MPa do 400 MPa. Vrijeme primjene tlaka varira ovisno o materijalu i iznosi svega nekoliko minuta. Postupkom hladnoga izostatskog prešanja postižu se gustoće u rasponu od 95 % do 97 % vrijednosti teoretske gustoće i poboljšanje mehaničkih svojstava [29]. Na slici 18. je shematski prikaz CIP postupka s pomičnim čepom za izradi cilindričnih uzoraka. Pritisak se također može ostvariti i puštanjem fluida kroz sapnice u zatvorenom cilindru i s nepomičnim čepom, što je prikazano na slici 19.



Slika 18. CIP postupak [25]



Slika 19. CIP postupak s nepomičnim čepom: a) početno stanje; b) stvaranje tlaka; c) gotov sirovac [25]

Najvažniji čimbenici koji utječu na konsolidaciju prahova pri hladnom izostatskom prešanju su učinci slaganja čestica praha, trenje među česticama, načini prenošenja sila kroz masu praha, intenzitet međusobnog vezivanja čestica te mehanizam kompaktiranja. Bitno je napomenuti, neovisno o vrsti praha, ključni parametar koji određuje gustoću otpreska je tlak [26].

Prednosti CIP postupka:

- više vrijednosti gustoće (95 % - 97 %) od jednoosnog kompaktiranja
- više čvrstoće prešanih komada (10 % - 15 %) sa smanjenim unutarnjim naprezanjima
- u većini slučajeva nema potrebe za vezivnim sredstvom, ne dolazi do raslojavanja niti do deformiranja i pucanja materijala u fazi sinteriranja
- bolja mehanička svojstva konačnog proizvoda
- nema ograničenje s gledišta dimenzija i oblika komada
- niski troškovi alata kod uporabe kalupa od gume ili plastike te niski troškovi materijala i naknadne obrade

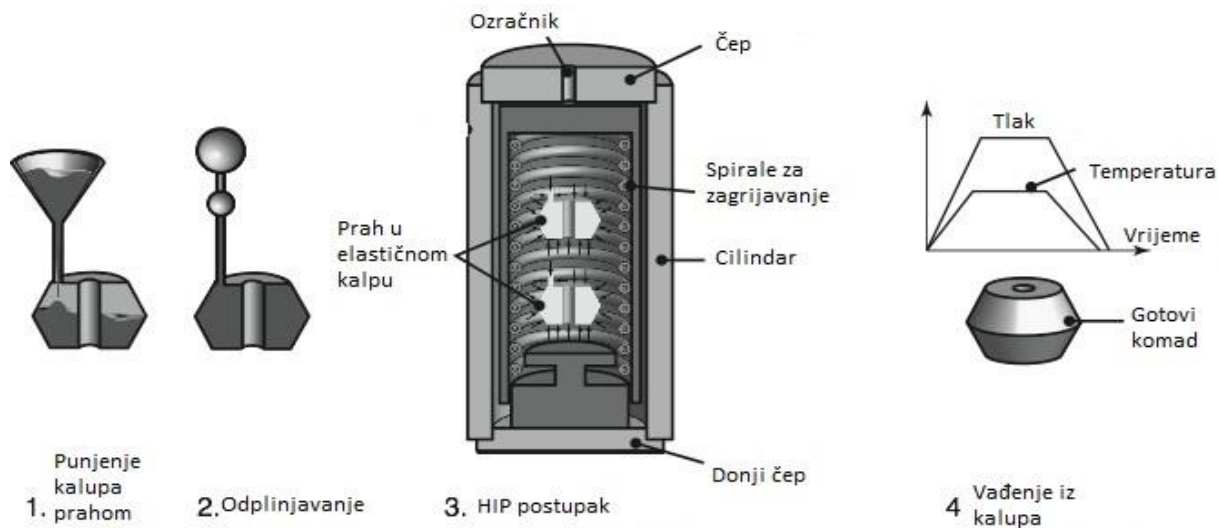
Nedostatci CIP postupka:

- dimenzije otpresaka su manje precizne nego kod prešanja u krutom kalupu
- površine izostatski prešanih kompakata su manje glatke
- produktivnost znatno niža
- kratki vijek trajanja elastičnih kalupa

2.5.4.3. Toplo izostatsko prešanje

Toplo izostatsko prešanje (HIP; eng. *hot isostatic pressing*), postupak je primjene izostatskog tlaka na komad pri povišenoj temperaturi u posebno konstruiranom spremniku. Tlak se primjenjuje pomoću inertnog plina iz svih smjerova jednako. Tijekom procesa najčešće upotrebljavan medij jest plin argona visoke gustoće, iako se koriste i helij i dušik. Pod navedenim uvjetima temperature i tlaka unutarnje pore i nepravilnosti raspadaju se i javlja se difuzijsko povezivanje na granicama zrna. Smatra se da prilikom HIP procesa naprezanje uzrokovano tlakom pri određenoj temperaturi prelazi vrijednost vlačne čvrstoće materijala. Posljedica plastične deformacije praha jest eliminacija poroziteta i postizanje 100 postotne teoretske gustoće gotovoga komada. Povišena temperatura prilikom procesa kreće se u rasponu od 480 °C za legure aluminija pa sve do 1700 °C za prahove volframa [25].

Postupak omogućuje zgušnjavanje u krutoj fazi, a sastoji se od nekoliko karakterističnih faza prikazanih na slici 20.



Slika 20. HIP postupak [32]

Prednosti HIP postupka:

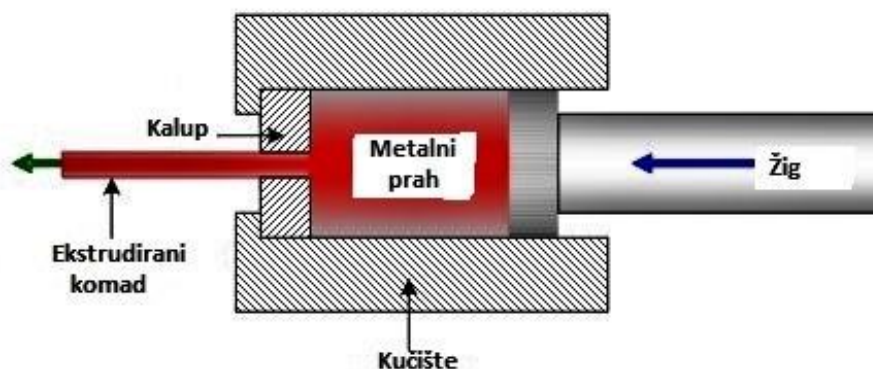
- postizanje 100 % teoretske gustoće, eliminacija poroziteta, homogena mikrostruktura
- mogućnost proizvodnje gotovih oblika
- poboljšana mehanička i tehnološka svojstva
- produljen vijek trajanja proizvoda
- povećana iskoristivost materijala

Nedostatci HIP postupka:

- mali zarez na površini zbog konsolidacije hidrostatskim naprezanjem
- visoki troškovi održavanja i visoki troškovi rada
- poteškoće pri održavanju visokog tlaka i temperature istovremeno
- ponekad se zahtijeva naknadna obrada gotovog komada

2.5.4.4. Ekstrudiranje

Ekstrudiranje je postupak tijekom kojeg se na smjesu praškastih materijala djeluje snažnim hidrostatskim silama te ga se protiskuje kroz određenu vrstu kalupa. Kao i kod prešanja i ekstrudiranje se može provoditi u toplom i hladnom stanju. U oba slučaja moguće je proizvesti materijal visoke gustoće i vrlo dobrih mehaničkih svojstava [33]. Ovakvu metodu konsolidacije moguće je provoditi na prethodno dobivenim sirovcima ili direktno u stanju rasutog praha. Kod vrućeg ekstrudiranja prah se najčešće kompaktira u praoblik nakon čega se ekstrudira pri povišenim temperaturama u zaštitnoj atmosferi. Istraživanja ove metode konsolidacije u početku su se uglavnom bavila ekstrudiranjem prahova aluminija i bakra te su utvrdila mogućnost izrade kompaktnih dijelova visoke gustoće. Svojstva tako konsolidiranih materijala ovise o početnim karakteristikama praha, ekstruzijskom omjeru, geometriji kalupa te ostalih parametara postupka [27]. Princip ekstrudiranja praha prikazan je na slici 21.

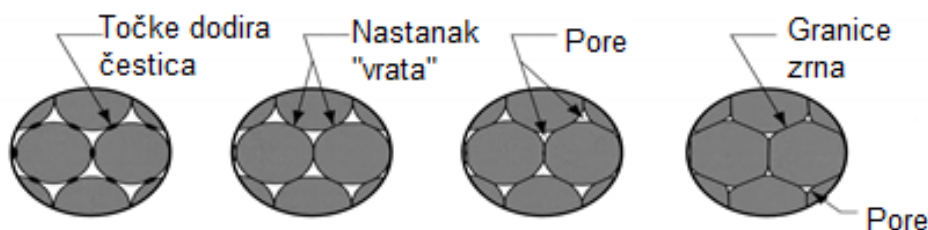


Slika 21. Ekstrudiranje praha [34]

2.5.5. Sinteriranje

Sinteriranje je najznačajnija tehnološka operacija postupka metalurgije praha. Definira se kao toplinska obrada praha ili kompaktiranog komada na temperaturi nižoj od temperature taljenja glavnog konstituenta (70 % - 90 % temperature tališta) u svrhu povezivanja čestica i poboljšanja čvrstoće. Čestice praha povezuju se zagrijavanjem na dovoljno visoku temperaturu, pri čemu dolazi do ubrzanih difuzijskih procesa između atoma čestica praha, njihova međusobnog povezivanja te, u konačnici, nastanka čvrstoga komada.

Tijekom postupka sinteriranja prethodno kompaktirani komad zagrijava se u vakuumu ili zaštitnoj atmosferi kao što je argon ili vodik. Nekoliko promjena događa se tijekom postupka sinteriranja: skupljanje, zgušnjavanje, nastanak krute otopine i nastanak konačne homogene mikrostrukture [29]. Faze pri postupku sinteriranja prikazane su na slici 22. Na početku inicijalizirano je spajanje čestica u točkama dodira. Potom točke dodira prerastaju u „vrat“ (eng. *neck*) te se smanjuju dimenzije pora između čestica praha. U zonama vrata formiraju se granice zrna te se pore smanjuju.



Slika 22. Faze sinteriranja praha

U većini slučajeva postupak sinteriranja imaće za posljedicu eliminaciju poroziteta, postizanje gotovo teoretske gustoće i željenih svojstava. Postupak sinteriranja može se podijeliti na:

- 1) sinteriranje u krutom stanju (eng. *solid state sintering*)
- 2) sinteriranje u prisustvu tekuće faze (eng. *liquid phase sintering*)

Procjenjuje se da je više od 70 % sinteriranih proizvoda dobiveno postupkom sinteriranja u tekućoj fazi, i to zbog prednosti kao što su niski troškovi proizvodnje i produktivnost [26].

Na konačna svojstva gotovog proizvoda pri sinteriranju utječu:

- atmosfera sinteriranja
- temperatura i vrijeme sinteriranja
- brzina zagrijavanja i hlađenja
- nečistoće

3. Eksperimentalni dio

U eksperimentalnom dijelu su se izrađivali Al i Cu uzorci kompaktiranjem prahova pomoću hladnog izostatskog prešanja (CIP). Cilj je da se kompaktiranjem prahova izradi konzistentan neprekidni spoj ova dva različita materijala te da se pokušaju postići zadovoljavajuća mehanička i električna svojstva. Sinteriranje prahova nije primijenjeno, već su kompaktirani prahovi korišteni u ispitivanju. Izrađeno je 5 vrsta uzoraka različitih udjela prahova Al i Cu, a to su sljedeći:

- Uzorak čistog Al
- Uzorak čistog Cu
- Uzorak s naglim prijelazom između Al i Cu (ravnomjerni spoj prahova)
- Uzorak s postepenim prijelazom između Al i Cu (mješavina prahova u srednjoj trećini uzorka)
- Uzorak pomiješanih prahova u omjeru 50:50

3.1. Izrada uzoraka

3.1.1. Prahovi

U izradi uzoraka korišten je aluminijski prah 99,7%-tne čistoće dobiven plinskom atomizacijom s promjerom čestica manjim od 400 μm , prikazan na slici 23. Bakreni prah je 99%-tne čistoće s nedefiniranim promjerom čestica, ali vidljivo sitnijom granulacijom od aluminijskog, prikazan na slici 24.



Slika 23. Al prah



Slika 24. Cu prah

3.1.2. Kompaktiranje prahova

Prahovi su kompaktirani postupkom hladnog izostatskog prešanja u ulju (CIP) na hidrauličkoj preši Katedre za deformiranje Fakulteta strojarstva i brodogradnje prikazanoj na slici 25. Pošto kod izostatskog prešanja sile pritiska djeluju na cijelu površinu uzorka, postupak zahtjeva primjenu elastičnog kalupa. Prah je stoga umotan u aluminijsku foliju kvadratnog oblika dimenzija 14 mm x 14 mm x 40 mm pomoću drvenog kalupa kao što je prikazano na slici 26. Drveni kalup služi za očuvanje oblika uzorka pri nasipavanju zbog malog poprečnog presjeka aluminijske folije i deformacije pri njenom rukovanju. Aluminijska folija ima funkciju elastičnog kalupa koji sadrži prah i osigurava njegov oblik, međutim zbog nedovoljne hermetičke zatvorenosti postoji opasnost od prodiranja ulja u kalup i otvaranja kompletnog kalupa s metalnim prahom. Iz tog se razloga aluminijski kalup umeće u elastičnu vrećicu izrađenu od lateksa prikazanu na slici 27, koja se jednostavnim čvorom zatvara i osigurava postojanost praha.



Slika 25. Hidraulička preša



Slika 26. Sipanje praha u kalup



Slika 27. Uzorci u elastomernoj vrećici

Prah nasipan u aluminijsku foliju kvadratnog oblika i zaštićen elastomernom vrećicom se potom umeće u cilindar s uljem koji se stavlja ispod radnog stapa preše (slika 28). Uzorak je prešan silom od 140 kN i tlakom 70 bara u trajanju od 30 sekundi na sobnoj temperaturi. Nakon otvaranja i vađenja uzorka iz elastomerne vrećice vidljivo je da se je uzorak uslijed velikog izostatskog tlaka deformirao i odstupio od prvotnog oblika i dimenzija, što je vidljivo na uzorcima čistog aluminija i bakra prikazanim na slici 29. S početnih dimenzija 14 mm x 14 mm x 40 mm uzorak se sabio na kvadar nepravilnog oblika i približnih dimenzija 12 mm x 12 mm x 30 mm. Uzorci su potom čeono glodani na dimenzije od 6 mm x 6 mm x 19.5 mm.



Slika 28. Cilindar s uljem pripremljen za CIP

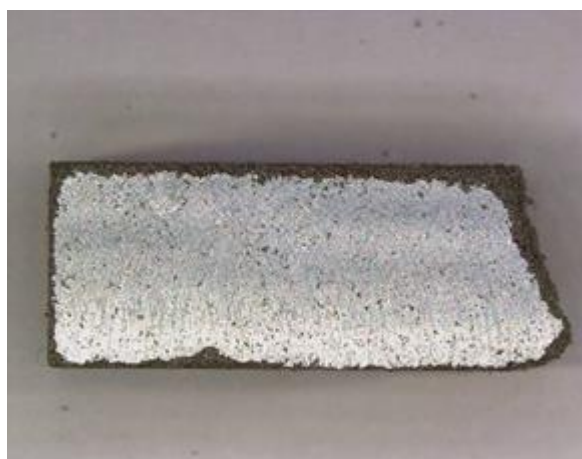


Slika 29. Uzorci u Al foliji nakon CIP-a

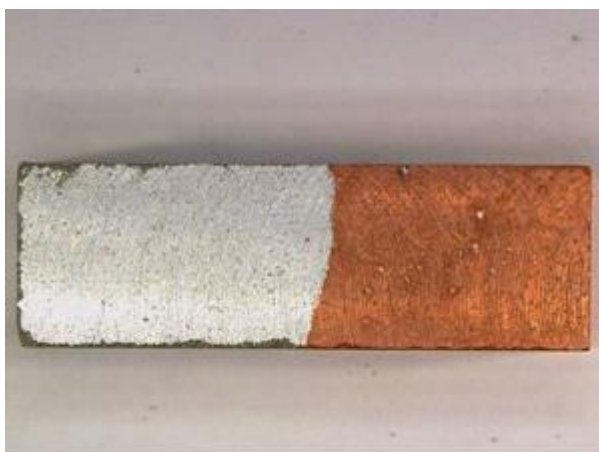
Po jedan uzorak je izrađen od čistog bakra i čistog aluminija, te su oni su poslužili za određivanje referentnih vrijednosti pri ispitivanju električnih svojstava (slika 30 i 31). Na uzorku čistog Al bilo je problema pri obradi odvajanjem čestica uslijed njegovog velikog stupnja poroziteta raspoređenog lokalno, što je razlog njegovog nepravilnog oblika nakon obrade. Osim toga izrađena su dva uzorka s naglim prijelazom između prahova uz pomoć pregrade pri nasipavanju prahova u kalup koja se prije kompaktiranja uklonila (slika 32). Dva uzorka su s postupnim prijelazom (prahovi su u drugoj trećini uzorka pomiješani kao što je vidljivo na slici 33) i jedan kompletni uzorak s prahovima pomiješanim u omjeru 50:50 (slika 34). Uzorci se prvotno podvrgavaju analizi mikrostrukture na mikroskopu.



Slika 30. Uzorak čistog Cu



Slika 31. Uzorak čistog Al



Slika 32. Uzorak s naglim prijelazom



Slika 33. Uzorak s postupnim prijelazom



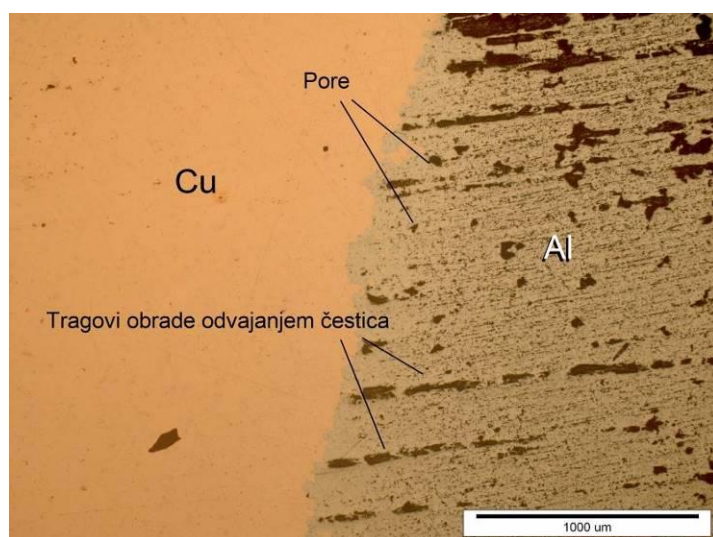
Slika 34. Uzorak pomiješanih prahova

Zbog ograničene količine praha i dimenzija uzoraka, na njima nije moguće provesti analizu mehaničkih svojstava poput vlačne čvrstoće i lomne žilavosti koje bi potvrdile stvarnu čvrstoću spoja. Prilikom ručnog ophođenja vidljivo je da su uzorci kompaktni i otporni na pokušaj loma ručnom silom, te da je spoj prahova čvrst i konzistentan.

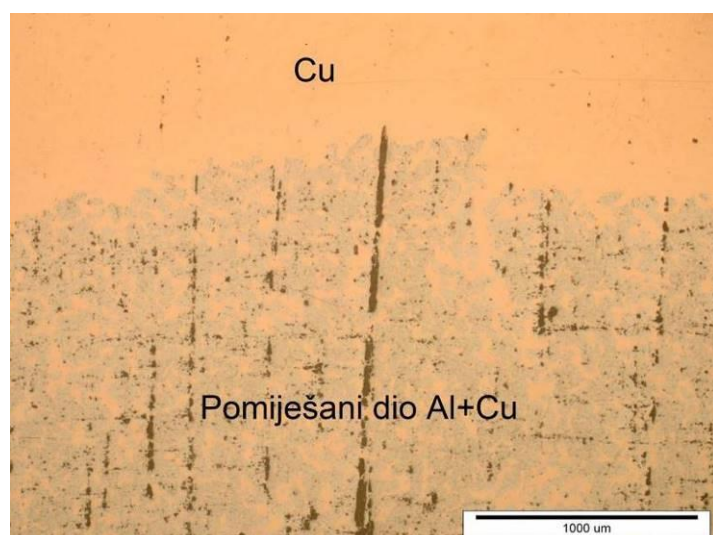
3.2. Analiza strukture

Analiza je provedena pomoću svjetlosnog mikroskopa tipa „Olympus GX51“ na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Prije same analize mikrostrukture potrebno je bilo pripremiti uzorak. Priprema se sastojala od ulijevanja u polimernu masu i brušenja. Nakon ulijevanja u polimernu masu i njenog očvršćivanja, uzorak se podvrgao brušenju brusnim papirom u 4 koraka. Prvo se koristio najgrublji brusni papir oznake P320, potom P500, P1000 i P2000 uz redovito ispiranje vodom radi otklanjanja viška polimerne mase. Uzorak je potom poliran dijamantnom pastom veličine čestica 3 μm , brzinom vrtnje polirnog uređaja od 150 okretaja u minuti uz hlađenje pomoću lubrikanta.

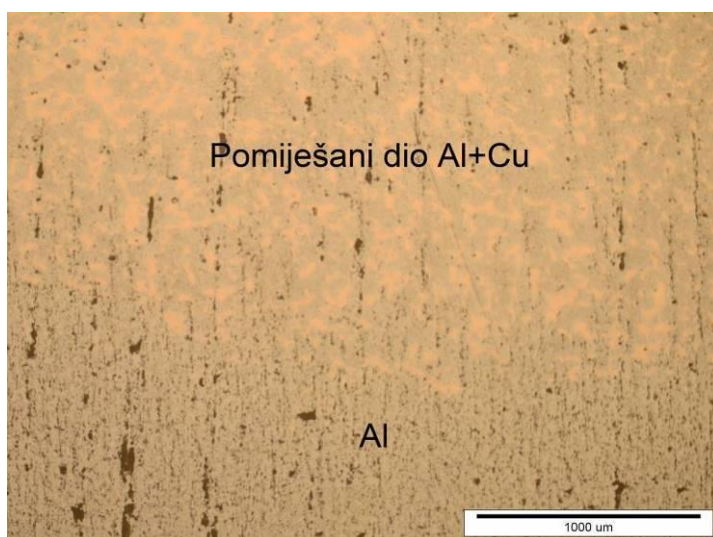
Na slikama 35, 36, 37, 38 i 39 prikazane su strukture uzoraka s vidljivim mjestima spoja dva praha. Preko računalnog programa „ImageJ“, koji služi za analizu slika, provedeno je optičko mjerenje poroziteta uzoraka. Računanjem srednje vrijednosti omjera pora i čvrste faze na uzorku čistog aluminija utvrđeno je da gustoća iznosi 91,8 % teorijske gustoće čistog aluminija, te će se taj iznos uzeti kao referentni. Iznos gustoće uzorka čistog bakra mjeren istom metodom iznosi 97,2 % teorijske gustoće, što su zadovoljavajući iznosi s obzirom na opremu korištenu pri izradi.



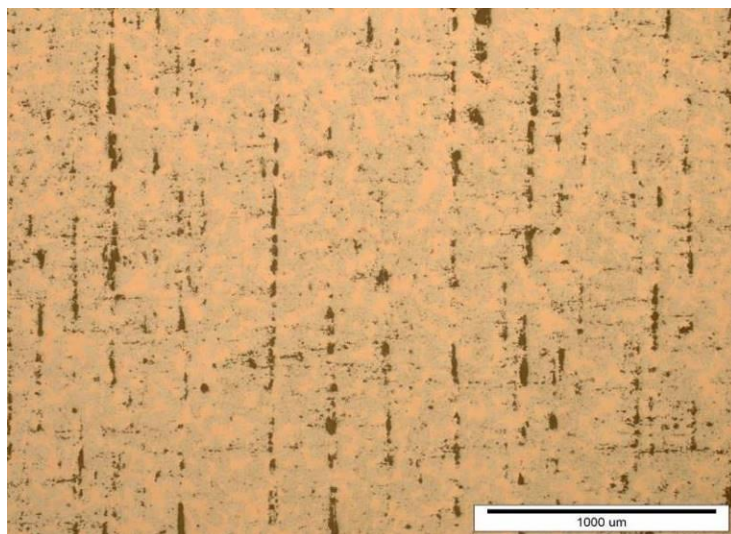
Slika 35. Spoj s naglim prijelazom između Al i Cu, povećanje 100x



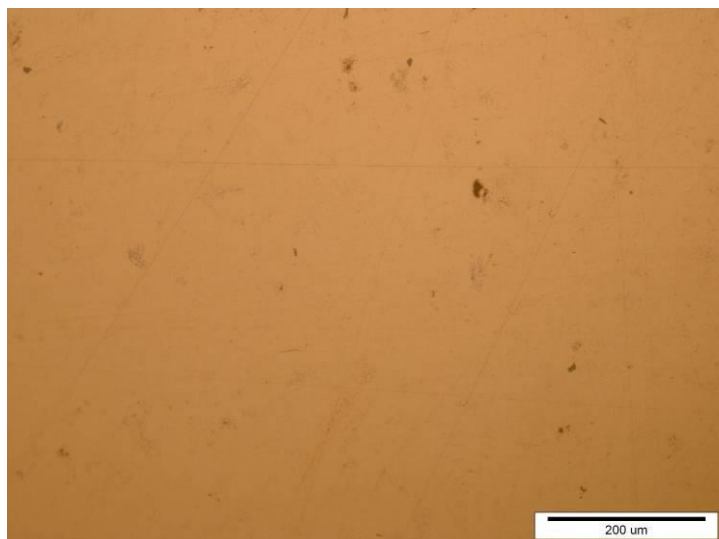
Slika 36. Spoj s postupnim prijelazom između Al+Cu i Cu, povećanje 100x



Slika 37. Spoj s postupnim prijelazom između Al i Al+Cu, povećanje 100x



Slika 38. Uzorak pomiješanih prahova u omjeru 50:50, povećanje 100x



Slika 39. Uzorak čistog Cu, povećanje 200x

Analizom mikrostrukture vidljiva je prisutnost poroziteta na uzorku čistog Al. Na slikama 35, 36 i 37 vidljive su pore unutar strukture kompaktiranog praha aluminija, koje su utjecale i na kvalitetu obrade odvajanjem čestica (linijski tragovi obrade), a kasnije i na rezultate ispitivanja električnih svojstava. Uzorak čistog Cu ima manji udio pora što je razlog sitnije granulacije praha, a sukladno tome pri obradi odvajanjem čestica nije bilo tragova i linijskih deformacija koje bi to potvrdile. Uzorci s naglim prijelazom imaju jasnu granicu razdiobe kompaktiranih prahova, a na uzorcima s postupnim prijelazom vidljiva je zona njihove pomiješanosti. U sve tri varijante uzoraka postigli su se dobri rezultati u smislu kompaktnosti i neprekinutosti spoja.

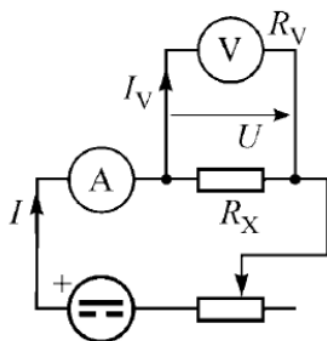
3.3. Ispitivanje električnih svojstava

Električna svojstva koja su se ispitivala na pripremljenim uzorcima su:

- Kontaktni otpor
- Strujno-temperaturna karakteristika
- Termovizija spoja

3.3.1. Kontaktni otpor

Princip mjerenja nepoznatog otpora se vrši UI metodom. Nepoznati otpor određujemo iz omjera napona U na uzorku i struje I kroz uzorak: $R = U/I$. Postoji dvije vrste spoja pri UI metodi, strujni i naponski spoj, pri čemu se strujni koristi za mjerenje vrlo velikih otpora, a naponski za mjerenje malih otpora. U ovom ispitivanju koristio se naponski spoj koji je sadržan u mjernom multimetru a shematski je prikazan na slici 40.



Slika 40. Shematski prikaz naponskog spoja kod UI metode

Teorijski izračun otpora:

$$R = \rho * \frac{l}{s}$$

R =kontaktni otpor [$m\Omega$]

$$\rho_{Cu} = \text{električna otpornost, za Cu} = 0,0175 \frac{\Omega mm^2}{m} \quad [35]$$

$$\rho_{Al} = \text{električna otpornost, za Al} = 0,0285 \frac{\Omega mm^2}{m} \quad [35]$$

l = duljina vodiča [m]

s = poprečni presjek [mm^2]

Dimenzije izrađenih uzoraka:

$$l = 19,5 \text{ mm}$$

$$s = 36 \text{ mm}^2$$

Teorijski izračun otpora uzoraka čistog bakra i aluminija:

$$R = \rho * \frac{l}{s} = 0,0175 * \frac{0,0195}{36} = 0,0094; \quad R_{Cu} = 0,0094 \text{ m}\Omega$$

$$R = \rho * \frac{l}{s} = 0,0285 * \frac{0,0195}{36} = 0,0154; \quad R_{Al} = 0,0154 \text{ m}\Omega$$

Teorijskim izračunom dobila se vrijednost otpora čistog bakra za navedeni uzorak od 0,0094 mΩ, a aluminija 0,0154 mΩ što su vrijednosti koje se žele dobiti mjerenjem na multimetru, uz određeni faktor odstupanja zbog udjela pora u strukturi. Teorijski izračun otpora ostalih uzoraka nije se provodio zbog razlike u strukturi, nepoznatog omjera količine prahova i neidealnih uvjetima izrade. Mjerenjem kontaktnog otpora želi se ispitati električna vodljivost, točnije razlika u vodljivosti između uzoraka čistog Al i Cu i ostalih uzoraka sa spojem ta dva materijala. Mjerenja su se provodila spajanjem kontakata mjernog uređaja na sve 4 površine kvadratnog uzoraka s po 5 ponavljanja. Rezultati su prikazani u tablici 4.

Tablica 4. Iznosi otpora prve šarže uzoraka u mΩ

Broj mjerenja							
Strana 1	Uzorak nagli prijelaz 1	Uzorak nagli prijelaz 2	Uzorak pomiješana sredina 1	Uzorak pomiješana sredina 2	Uzorak sve pomiješano	Uzorak cisti Al	Uzorak cisti Cu
1	0,14	1,21	1,36	0,95	1,24	x	0,33
2	0,31	0,09	1,77	0,52	1,78		0,31
3	0,14	0,94	1,62	0,96	1,18		0,3
4	0,13	0,1	1,45	0,47	1,2		0,31
5	0,12	1,09	1,44	0,48	1,18		0,3
Strana 2							
1	0,13	1,14	1,43	0,5	1,11	x	0,31
2	0,15	1,28	1,41	0,49	1,18		0,31
3	0,16	0,15	1,46	0,5	1,09		0,31
4	0,16	0,99	1,44	0,5	1,18		0,32
5	0,15	0,12	1,45	0,51	1,12		0,31
Strana 3							
1	0,15	0,12	1,79	0,52	1,18	x	0,31
2	0,14	0,13	1,76	0,52	1,23		0,32
3	0,14	0,26	1,63	0,51	1,2		0,3
4	0,13	0,14	1,68	0,52	1,24		0,31
5	0,14	0,16	1,73	0,93	1,17		0,3
Strana 4							
1	0,14	0,14	1,68	0,88	1,31	x	0,31
2	0,13	0,14	1,72	0,63	1,24		0,3
3	0,13	0,15	1,69	0,84	1,2		0,3
4	0,11	0,31	1,56	0,85	1,24		0,3
5	0,13	0,13	1,5	0,59	1,18		0,31
Srednja vrijednost	0,1465	0,4395	1,5785	0,6335	1,2225	x	0,3085
Standardna devijacija	0,039404949	0,445224382	0,13871824	0,180728387	0,137035579	x	0,00792149

Kao što je vidljivo iz tablice, iznos mjerenog otpora čistog Cu je 0,3085 mΩ, što je 3 puta veće od teorijskog iznosa, a uzorak čistog Al imao je beskonačan otpor, što znači da nije provodio struju. Zbog izrazito loših rezultata mjerenja kojima je iznos otpora višestruko veći od teorijskog izradila se druga šarža uzoraka s istom sirovinom i istim postupkom proizvodnje, zbog sumnje u kvalitetu prvotno izrađenih uzoraka.

U drugoj šarži uzoraka izradile su se iste vrste uzoraka, odnosno po jedan čistog Al i Cu, 3 uzorka s naglim prijelazom i 2 uzorka s postepenim prijelazom prahova te se ponovilo ispitivanje kontaktnog otpora jednakom metodom kao i kod prve šarže. Rezultati 2. šarže prikazani su tablicom 5.

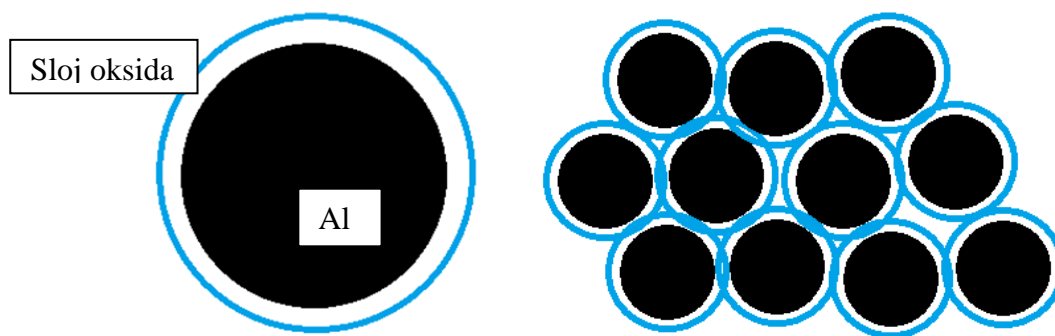
Tablica 5. Iznosi otpora druge šarže uzoraka u mΩ

Broj mjerenja							
Strana 1	Uzorak nagli prijelaz 1	Uzorak nagli prijelaz 2	Uzorak nagli prijelaz 3	Uzorak pomijesana sredina 1	Uzorak pomijesana sredina 2	Uzorak cisti Al	Uzorak cisti Cu
1	2,531	4,23	0,4	1,59	0,3	7,98	0,45
2	19,89	5,8	0,39	1,59	0,24	0,92	0,47
3	19,1	5,9	0,37	1,46	0,2	0,89	0,46
4	19,7	6,1	0,35	1,48	0,21	0,9	0,45
5	20	5,4	0,38	1,5	0,22	0,95	0,42
Strana 2							
1	19,8	5,5	0,41	1,38	0,21	0,93	0,44
2	18,4	5,6	0,42	1,35	0,54	1,4	0,48
3	18,18	5,2	0,79	1,4	0,2	1,25	0,47
4	18,15	5,1	0,3	1,28	0,21	1,38	0,44
5	17,5	3,7	0,7	1,59	0,5	1,46	0,42
Strana 3							
1	17,3	5	0,5	1,65	0,18	1,45	0,41
2	17,7	6,2	2	1,7	0,65	1,39	0,39
3	14,3	6	0,3	1,23	0,52	1,01	0,37
4	19,6	6,3	0,22	1,38	0,4	0,93	0,36
5	16,3	8,6	0,36	1,4	0,57	0,19	0,38
Strana 4							
1	15,1	7,2	0,26	1,38	0,58	0,2	0,39
2	15	2,1	0,38	1,75	0,31		0,4
3	14,3	0,5	0,42	1,78	0,67		0,45
4	13,72	0,59	0,47	1,4	0,48		0,37
5	18,1	0,6	0,5	1,24	0,27		0,41
Srednja vrijednos	16,73355	4,781	0,496	1,4765	0,373	1,451875	0,4215
St.DEV	3,918494938	2,226654087	0,378465044	0,162748595	0,172018971	1,783693616	0,037173137

Vidljivo je kako je nakon izrade druge šarže otpor na nekim uzorcima veći što eliminira sumnje u nepravilnosti pri izradi i izvođenju ispitivanja na prvoj šarži. Rezultati ispitivanja kontaktnog otpora su veći od teorijskih vrijednosti, a i standardna devijacija ima velike iznose te kazuje da su mjerenja u velikim odstupanjima. Pretpostavljeni razlozi velikih iznosa kontaktnih otpora su sljedeći:

- Oksidi na kristalnim zrnima praha

Zbog dužeg vremena skladištenja prahova u nezaštićenom pakiranju i atmosferi na rubovima zrna nastaje oksidni sloj koji nije vodič. Između svakog kristalnog zrna postoji sloj oksida koji je nakon kompaktiranja sadržan duž cijelog uzorka te stvara otpor. Velika odstupanja kod mjerenja istog uzorka na pojedinim površinama dodatni je dokaz utjecaja oksida koji su lokalno raspoređeni. Shematski je prikazan na slici 41 izgled kompaktiranih zrna praha i sloj oksida između njih koji sprječava protjecanje struje.



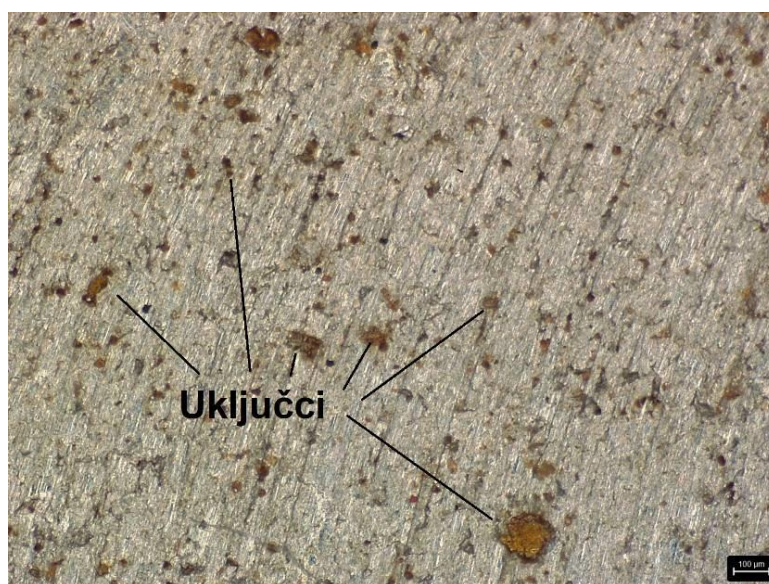
Slika 41. Kristalna zrna Al sa slojem oksida na površini

- Porozitet

Samim postupkom CIP-a u ulju ne mogu se dobiti iznosi gustoće veći od 95-97 % teorijske gustoće. Pošto pri procesu izrade uzoraka na kojima je vršeno ispitivanje nisu vladali idealni uvjeti kako kvalitete prahova, tako i parametara samog postupka, očekivano je da će poroznost biti veća nego pri idealnim uvjetima. Optičkom analizom u softveru „ImageJ“ utvrđeno je da su uzorci aluminija u vrijednostima oko 91% teorijske gustoće, stoga iznos pora od oko 9% uvelike povećava iznos otpora cijelog uzorka.

- Uključci

Prilikom analize na mikroskopu uočeni su razni uključci i nečistoće u strukturi uzoraka (slika 42). Razlog je također ne idealno rukovanje prahom te ne idealni uvjeti pri izradi istih uzoraka. Svaka nehomogenost u strukturi povećava njen konačni otpor.

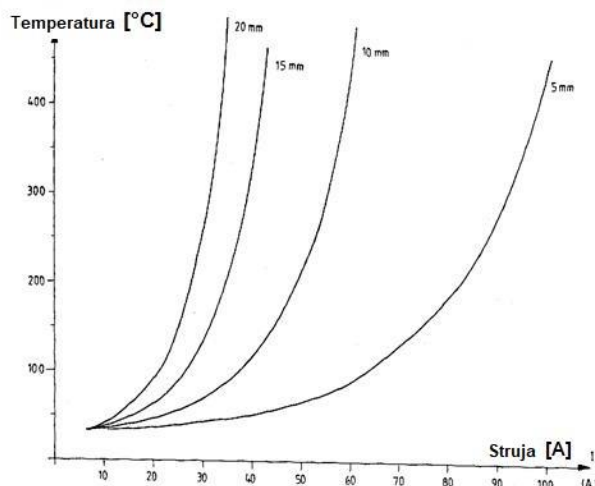


Slika 42. Uključci i nečistoće u uzorku čistog Al, povećanje 45x

U daljnjem ispitivanju su korišteni uzorci iz prve šarže, i to samo oni s naglim prijelazom između prahova, koji su pokazali relativno dobre rezultate pri ispitivanju otpora. Razlog te odluke leži u činjenici da se pri ispitivanju strujno temperaturne karakteristike temperatura uzoraka s velikim otporom povećava do vrijednosti koje bi mogle naškoditi dijelovima mjernog uređaja i otežati provođenje samog ispitivanja.

3.3.2. Strujno temperaturna karakteristika

Cilj ovog ispitivanja je bilo pokazati koliko zapravo dobro materijal homogeno vodi struju, te koliko se uslijed provođenja mijenja temperatura. Na slici 43 prikazan je graf strujno-temperaturne karakteristike različitih debljina žice čistog aluminija, iz čega je vidljivo da se povećanjem poprečnog presjeka povećava iznos temperature za struje veće od 10 A.



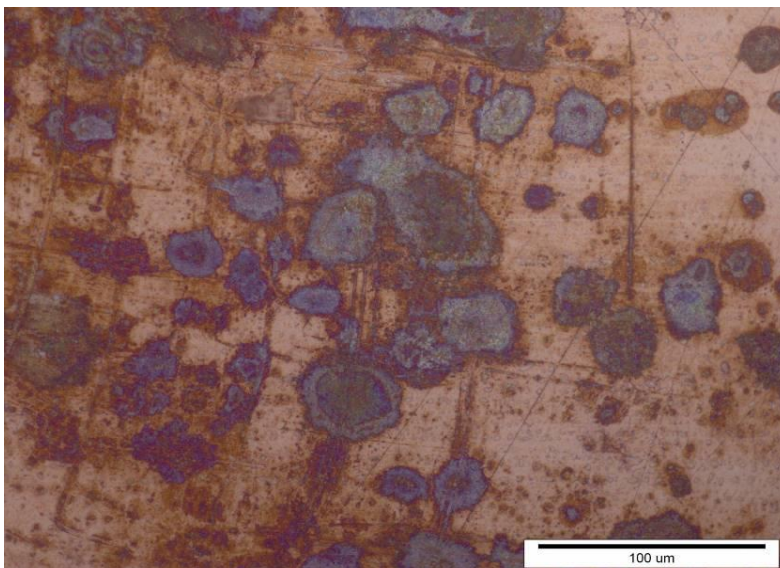
Slika 43. Graf strujno-temperaturne karakteristike Al žice [36]

Hvataljke izvora spojene su na oba kraja uzorka te je puštena struja konstantnog iznosa od 1 A i kasnije od 5 A. Na uzorak se prislanja ticalo termopara, odnosno senzora za mjerenje temperature, kako bi se utvrdila njena promjena pri protjecanju struje. U svim uzorcima se uslijed puštanja struje pojavio značajan porast temperature koji je vidljivo zapažen pojavom laganog dima na kontaktnim spojevima. Stoga je materijal podvrgnut analizi na termokameri, odnosno termoviziji, kako bi se utvrdilo prisustvo različitih temperaturnih polja koja su posljedica nehomogenosti strukture. Prilikom mjerenja na ispitnom multimetru temperature uzoraka s naglim prijelazom prahova iznosila su oko 105 °C pri struji od 1 A, a čak oko 200 °C pri struji od 5 A.

Razlog je to kombinacije utjecaja velikog poprečnog presjeka uzorka, poroznosti, oksida na zrnima i uključaka u strukturi, te toliki iznosi temperatura nisu sigurni za rukovanje pri provođenju daljnjih ispitivanja na višim strujama. Uzorci su potom ponovno promatrani na svjetlosnom mikroskopu gdje su uočeni znakovi lokalnog zapaljenja u obliku promjene boje na mjestima postojanja oksida na površini uzorka pri visokim temperaturama, što je vidljivo na slikama 44 i 45.



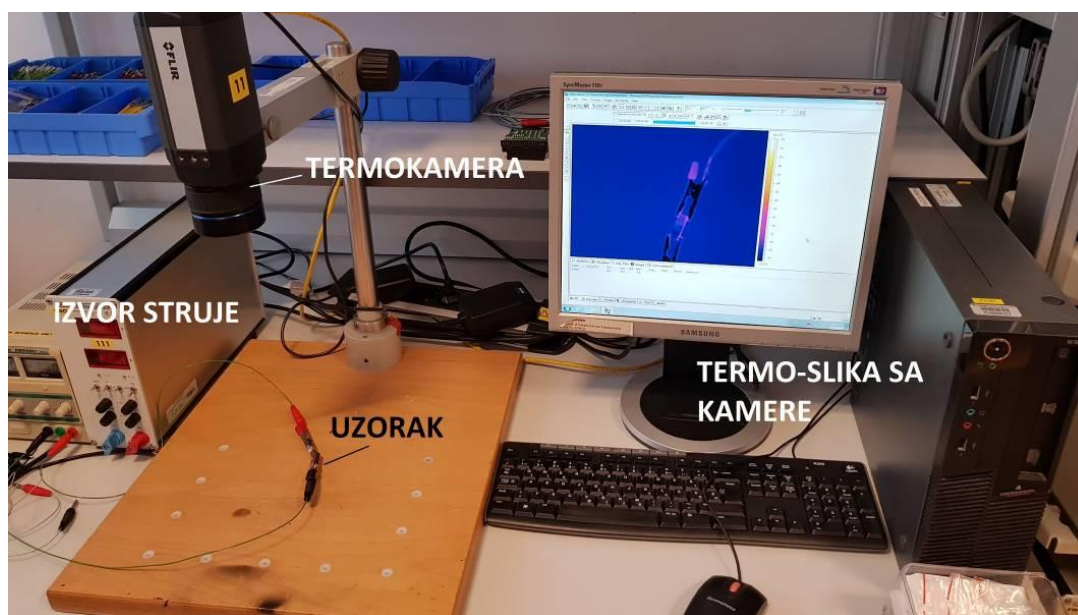
Slika 44. Izgled površine uzorka nakon ispitivanja pri struji od 1 A, povećanje 45x



Slika 45. Izgled površine uzorka Cu nakon ispitivanja pri struji od 1 A, povećanje 100x

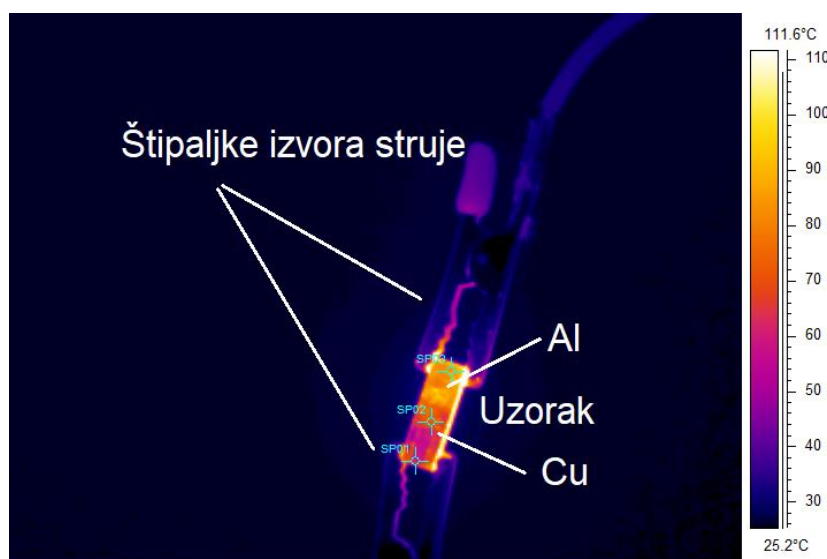
3.3.3. Termovizija spoja

Termovizijom spoja se mjeri lokalno zagrijavanje uzorka usred protjecanja struje konstantnog iznosa. U našem slučaju radi se o strujama od 1 A i 5 A. U ovom ispitivanju koristili su se uzorci s naglim prijelazom prahova aluminijskog i bakrenog. Postupak se provodi spajanjem uzorka na izvor konstantne struje, te se termo kamerom prati promjena temperature na površini uslijed protjecanja struje kao što je prikazano na slici 46.



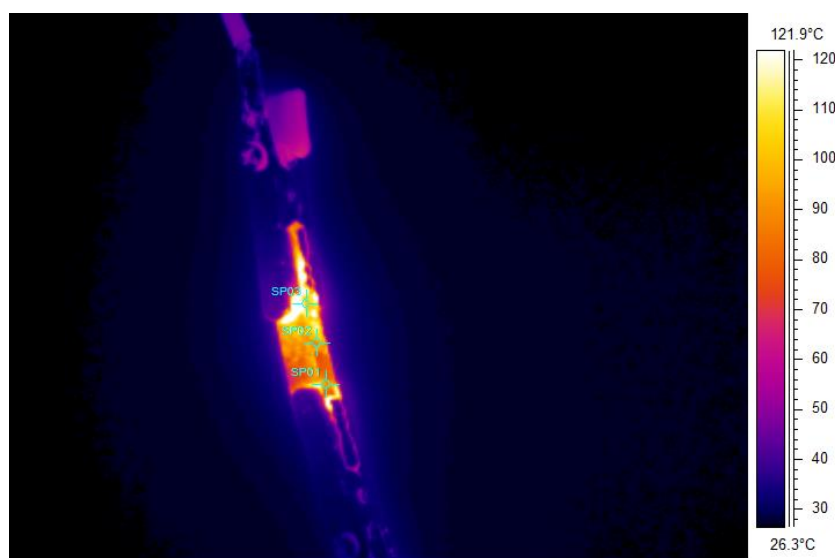
Slika 46. Oprema za termoviziju

Na slici 47 prikazana je raspodjela temperature po površini uzorka sa naglim prijelazom između prahova aluminijskog i bakrenog nakon 1 minute protjecanja struje od 1 A. Vidljivi su iznosi temperaturnih polja koji se kreću od 50 °C do 105 °C, gdje su polja više temperature na strani aluminijskog.



Slika 47. Termovizija Al-Cu spoja pri struji od 1 A

Na istom uzorku se potom struja povećala na 5 A, a prikaz raspodjele temperature po površini uzorka prikazan je na slici 48. Temperature su na nekim dijelovima dostizale preko 120 °C već nakon nekoliko sekundi, te se zbog sigurnosnih razloga nije dalje provodilo ispitivanje.



Slika 48. Termovizija Al-Cu spoja pri struji od 5 A

Vrijednosti temperatura na ostalim uzorcima s naglim prijelazom između prahova su također bila sličnih iznosa, što potvrđuje tvrdnju da uzorci nisu prikladni za ozbiljnija električna ispitivanja ili usporedbu s nekim konvencionalnim materijalima slične namjene.

4. ZAKLJUČAK

Ostvarivanje spoja aluminijskog i bakrenog praša izvedeno je raznim tehnologijama koje koriste visok unos energije u mjesto spoja, međutim troškovi tih postupaka su visoki te ti postupci nisu primjenjivi za izradu manjih serije proizvoda. Primjenom tehnologije metalurgije praša moguće je trajno spojiti aluminijski i bakreni praš kompaktiranjem postupkom hladnog izostatskog prešanja u ulju, što je dokazano navedenim eksperimentalnim radom.

Prašovi su se pokazali optimalni za izradu kompaktnih uzoraka. Izrađeni su uzorci dimenzija 6 mm x 6 mm x 19,5 mm koji su postojali na pokušaj prekidanja spoja ručnom silom kod svih vrsta prijelaza između prašova. Dobivenom gustoćom od 91,8 % teorijske gustoće kod aluminijskog i 97,2 % kod bakra i dalje je velika prisutnost pora u strukturi, ali su dobiveni uzorci kompaktni, konzistentni i bez nepravilnosti u strukturi osnovnih materijala i spoja.

Ispitivanjem električnih svojstava utvrđeno je da stanje uzoraka nije za efektivnu primjenu u električnim vodovima. Kompaktirani uzorci čistih osnovnih materijala pokazali su velik otpor pri protjecanju struje, stoga nije bilo za očekivati da će rezultati uzoraka spojenih prašova biti zadovoljavajući. Također se prilikom protjecanja struja većih iznosa lokalno pojavljivala velika temperaturna oscilacija s dosegom čak do 200 °C, što izuzetno ugrožava sigurnost u okvirima autoindustrije. Nadalje nakon podvrgavanja uzorka protjecanju struja od 1 A i 5 A na uzorku su vidljiva mjesta lokalne oksidacije uslijed prevelikog zagrijavanja na granicama zrna aluminijskog praša. Rezultat je to neadekvatnog skladištenja praša zbog čega su na površini zrna nastali oksidi, kao i poroznosti i prisutnosti raznih uključaka i nečistoća koje su nastale u procesu izrade uzoraka.

Iz navedenog može se zaključiti da je prvotni cilj rada ostvaren, tj. da se postigao spoj aluminijskog i bakrenog praša metalurgijom praša. Provedenim istraživanjem otvara se široki spektar novih područja za daljnja ispitivanja u smjeru spajanja materijala različitih svojstava. Kombinacijom udjela prašova, primjenom drugačijih načina kompaktiranja te sinteriranjem zasigurno bi se dobili povoljniji rezultati električnih svojstava koji bi otvorili mogućnost primjene metalurgije praša u ove svrhe.

LITERATURA

- [1] Natalija Dolić: *Metalurgija aluminija*, Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2015.
- [2] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2011.
- [3] C. Vargel, *Corrosion of aluminium*, Oxford, Elsevier, 2004.
- [4] Davis, J.R.: *Aluminum and Aluminum Alloys*, ASM International, 1993.
- [5] Dostupno na: <http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/cu/spojevi.html>
- [6] Dario Mašinović: *Ispitivanje svojstava bakrene i aluminijske legure i njihova spoja za primjenu u elektrotehnici*, Završni rad, Sisak 2016.
- [7] Dostupno na: https://www.engineeringtoolbox.com/electrode-potential-d_482.html
- [8] Dostupno na: <http://www.incore-cables.com/price-advantage-of-aluminium-cables>
- [9] J. I. Frenkelj, *Uvod u teoriju metala*, Moderna fizika, Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- [10] I. Galvão, D. Verdera, D. Gesto, A. Loureiro, D. M. Rodrigues: *Analysing the challenge of aluminium to copper fsw*,
- [11] Branko Bauer: *Optimiranje parametara laserskog zavarivanja čelika za poboljšavanje*, Zagreb, 2006.
- [12] Fraunhofer-institut für werkstoff-und strahltechnik iws: *Joining of Al-Au mixed combinations*, Dresden - www.iws.fraunhofer.de
- [13] ASM International Handbook Committee: *ASM Handbook – Welding, Brazing and Soldering*, ASM International Materials park, 1993.
- [14] G. Meden, A. Pavelić, D. Pavletić, *Osnove zavarivanja*, Sveučilište u Rijeci – Tehnički fakultet, Rijeka, 2000.
- [15] Duško Pavletić: *Zavarivanje I*, Tehnički fakultet Rijeka, 2011.
- [16] Bojan Kraut: *Strojarski priručnik*, Tehnička knjiga Zagreb 2009.
- [17] Dostupno na: <http://www.bil-ibs.be/en/onderzoeksproject/soudimma-electromagnetic-pulse-welding>
- [18] Dostupno na: <http://www.join-em.eu/index.html>
- [19] Karl-Heinz Decker: *Elementi strojeva*, Tehnička knjiga Zagreb, 1975.
- [20] Dostupno na: <http://eu.harrisproductsgroup.com/en/Expert-Advice/Articles/turn-up-the-brazing-heat.aspx>

- [21] I. Garašić: Lemljenje, predavanje sa kolegija Zavarivanje i montaža, Zagreb 2017.
- [22] Dostupno na: <http://www.aluminium-brazing.com/2010/03/brazing-aluminium-and-copper>
- [23] Dostupno na: https://skmetal21.en.ec21.com/offer_detail/Sell_Brazing_Filler_Metals_No--18671816.html
- [24] Dostupno na: https://www.iws.fraunhofer.de/en/business_fields/surface_treatment/surface_treatment/equipment/laser_roll_plating_equipment.html
- [25] Ljerka Slokar: *Metalurgija praha i sinter materijali*, skripta, Metalurški fakultet, Sisak 2015.
- [26] Ružica Budim: *Hladno izostatsko prešanje aluminijskog prada*, Završni rad, Zagreb 2017.
- [27] Mateja Šnajdar Musa: *Razvoj titan-magnezij kompozita za biomedicinsku primjenu*, Doktorski rad, Zagreb 2015.
- [28] Dostupno na: <http://www.mpif.org/IntroPM/process.asp?linkid=2>
- [29] Tamara Aleksandrov Fabijanić: *Razvoj referentnih pločica tvrdoća po Vickersu postupkom metalurgije praha*, Doktorski rad, Zagreb 2014.
- [30] V. Marinov: *Manufacturing processes for metal products - Powder metallurgy*, Kendall Hunt Publishing, 2010
- [31] Gopal S. Upadhyaya: *Powder Metallurgy Technology*, Cambridge International Science publishing
- [32] G. Cukor: *Proizvodne tehnologije*, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, 2008.
- [33] S.R. Martins, W.Z. Misiolek: *Consolidation of particulate materials in extrusion*, Rev. Particulate Mater., Vol. 4, 43–70, 1996.
- [34] Dostupno na: <http://allengineering-info.blogspot.hr/2011/05/methods-of-compacting-powder-metallurgy.html>
- [35] Dostupno na: <http://www.tibtech.com/conductivity.php>
- [36] Dostupno na: <http://www.powerguru.org/wire-bonding-technology>

PRILOZI

I. CD-R disc